



Universidade de Aveiro Departamento Engenharia Civil
2010

**Raul Xavier Leandro
Pereira**

**Misturas Betuminosas Temperadas: Estudo da
Interacção Aditivo-Ligante**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2010

**Raul Xavier Leandro
Pereira**

Misturas Betuminosas Temperadas: Estudo da Interacção Aditivo-Ligante

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Prof. Doutor Aníbal Costa

Professor catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Rui Alexandre Baltazar Micaelo

Professor auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta

Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Agostinho Benta, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, orientador desta dissertação, pelo apoio, acompanhamento, disponibilidade e pela análise crítica ao texto original;

À empresa Probigalp – Ligantes Betuminosos S.A. pela oportunidade que me deram com a realização do estágio laboratorial, decisivo para a realização deste trabalho. Por todas as facilidades concedidas um especial agradecimento;

À Engenheira Cátia Duarte, pela orientação do estágio, pela oportunidade de partilha das instalações do laboratório, elaboração de todo o procedimento experimental e na cedência de toda a informação para a elaboração da presente dissertação e pelo permanente incentivo;

Ao Sr. Augusto Almeida, chefe de Laboratório, pela constante disponibilidade e apoio na análise dos dados;

Aos técnicos de laboratório, em particular ao Ulisses Teixeira e ao Nuno Pires pela dedicação, esclarecimento de dúvidas e acompanhamento na execução dos ensaios;

Ao Engenheiro Carlos Cabanas, pelas sugestões e disponibilidade na resolução dos problemas que foram surgindo ao longo de todo o trabalho.

Aos meus pais e irmãos, pelo importante e constante apoio, tornando possível a realização deste trabalho.

Palavras-chave

Betume, betume modificado, misturas betuminosas a quente, misturas betuminosas temperadas, aditivos, pavimentos rodoviários.

Resumo

O principal objectivo deste trabalho foi o de avaliar os efeitos da interacção de diferentes betumes asfálticos com dois dos aditivos mais utilizados para a produção de misturas betuminosas temperadas, Rediset™ e Cecabase®. Foram utilizadas amostras de betume base 10/20, 35/50 e modificado com borracha 35/50, efectuando-se a sua caracterização e posterior análise para as diversas percentagens de aditivo e tempos de agitação. Estudaram-se propriedades fundamentais para a compreensão do comportamento reológico dos betumes, tais como: penetração a 25°C; temperatura de amolecimento (método do anel e bola); viscosidade dinâmica; estabilidade de armazenamento, recuperação elástica e; a resistência ao envelhecimento – método RTFOT.

Este trabalho fomenta a aplicação de aditivos, de modo a obtenção de um menor consumo energético na produção das misturas betuminosas e uma menor emissão de gases.

Keywords

Bitumen, modified bitumen, warm mix asphalt, hot mix asphalt, bitumen additives, road pavements.

Abstract

The aim of this research was to determinate the behavior of bitumen containing additives as rediset™ and cecabase®, used in temperate betuminous mixtures. Samples of bitumen base 10/20, 35/50 and modified with rubber 35/50 were used, characterized and afterwards analysed according to the amounts of additives and agitation period. The following tests were held: needle penetration at 25°C, softening point – Ring and ball method, viscosity of bitumen using a rotating spindle apparatus, storage stability, elastic recovery and the resistance to hardening under the influence of heat and air, RTFOT method.

This project fosters the use of additives in order to consume less energy in the production of bituminous mixtures and to reduce gas emissions.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1. Enquadramento	3
1.2. Objectivos	5
1.3. Conteúdo da tese	6
2. LIGANTES BETUMINOSOS	9
2.1. Betumes naturais.....	9
2.2. Alcatrão.....	11
2.3. Betumes puros.....	12
2.4. Betumes fluidificados (<i>cut-back</i>).....	15
2.5. Emulsões betuminosas	16
2.6. Betumes modificados.....	20
2.6.1. Betumes modificados com polímeros	20
2.6.2. Fibras	25
2.6.3. Modificadores químicos	26
2.6.4. Betume modificado com borracha recuperada de pneus em fim de vida.....	27
3. MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS.....	31
3.1. Técnicas de produção de misturas betuminosas temperadas	32
3.1.1 Técnicas de espuma	34
3.1.2. Aditivos químicos.....	41
3.1.3. Aditivos orgânicos.....	45
3.2. Vantagens e desvantagens das misturas betuminosas temperadas	48
3.3. Legislação das misturas betuminosas temperadas	49
4. ESTUDO DA INTERACÇÃO ADITIVO-LIGANTE.....	53
4.1. Introdução	53

4.2.	Ensaaios de caracterização dos betumes base e modificado com borracha.....	54
4.2.1.	Procedimento adoptado na caracterização dos betumes.....	55
4.2.2.	Valores obtidos na caracterização dos ligantes	61
4.3.	Aditivos e protocolo experimental.....	62
4.4.	Resultados do B35/50 com Cecabase®	64
4.4.1.	B35/50 com 0,10% de Cecabase®	64
4.4.2.	B35/50 com 0,15% de Cecabase®	68
4.4.3.	B35/50 com 0,20% de Cecabase®	70
4.4.4.	B35/50 com 0,30% de Cecabase®	72
4.4.5.	Estabilidade ao armazenamento do B35/50 com Cecabase®	73
4.4.6.	Discussão dos resultados	74
4.5.	Resultados do B35/50 com Rediset™ WMX	75
4.5.1.	B35/50 com 1,0% de Rediset™ WMX	75
4.5.2.	B35/50 com 1,5%, 2,0% e 3,0% de Rediset™ WMX.....	77
4.5.3.	Estabilidade de armazenamento do B35/50 com Rediset™ WMX	80
4.5.4.	Discussão dos resultados B35/50	80
4.6.	Resultados do BBM 35/50	82
4.6.1.	BBM 35/50 com Cecabase®	82
4.6.2.	BBM 35/50 com Rediset™ WMX	84
4.6.3.	Discussão dos resultados BBM 35/50	86
4.7.	Resultados do betume 10/20	87
4.7.1.	Betume 10/20 com Cecabase®	87
4.7.2.	Betume 10/20 com Rediset™ WMX.....	88
4.7.3.	Discussão dos resultados B10/20	90
4.8.	Discussão geral dos resultados	91
5.	ESTUDO: MISTURA BETUMINOSA COM REDISET™	101

5.1. Introdução	101
5.2. Caracterização dos materiais	102
5.3. Mistura betuminosa de alto módulo.....	105
5.4. Determinação da percentagem óptima de betume	106
5.4.1. Método de Marshall.....	107
5.4.2. Equação de Duriez.....	112
5.5. Análise do comportamento da mistura com Rediset™ WMX	113
5.6. Discussão de resultados	121
6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	133
6.1. Conclusão.....	133
6.2. Trabalhos futuros	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Lago de Trindade e Tobago (Sciencelay 2010).....	10
Figura 2.2 - Aquecimento da rocha asfáltica (IN.gov, 2009)	10
Figura 2.3 - Amostra de rocha asfáltica em pó (cortesia da Probigalp – foto do autor).....	11
Figura 2.4 - Estrutura química tipo dos asfaltenos, aromáticos e saturados (adaptado de Silva 2005).....	13
Figura 2.5 - Variação da composição e envelhecimento de um betume asfáltico durante a fase de mistura, compactação e durante o tempo de serviço (Adaptado de Read, Whiteoak et al. 2003).....	15
Figura 2.6 - Esquema de adesão do betume ao agregado. (Adaptado de Read, Whiteoak et al. 2003)	18
Figura 2.7 - Esquema de uma central de emulsões betuminosas (adaptado Kett I. 1998) ..	19
Figura 2.8 – a) Esquema tridimensional da estrutura de um elastómero (Read, Whiteoak et al. 2003)	22
Figura 2.9 - Imagens microscópicas da interação do betume/polímero, a) compatível e b) incompatível (Read, Whiteoak et al. 2003)	23
Figura 2.10 - Amostra de EVA utilizado na modificação do betume (cortesia da Probigalp – foto do autor)	24
Figura 2.11 - Imagens microscópicas do betume com EVA [a) Após efectuada a mistura, b) Face superior do provete, passado 24h de efectuada a mistura e armazenado a 165°C, c) Face inferior do provete, passado 24h de efectuada a mistura e armazenado a 165°C] (Gonzalez, Munoz et al. 2004)	25
Figura 2.12 - Amostra de borracha utilizada na modificação do betume (cortesia da Probigalp – foto do autor).....	27
Figura 3.1 - Classificação das misturas betuminosas em função da temperatura de produção (EAPA 2010)	31
Figura 3.2 - Diferença nas emissões de fumos e gases observados na central durante a descarga de uma mistura betuminosa a quente e uma temperada (Ferreira, Oliveira et al. 2009)	32
Figura 3.3 - Estrutura molecular de uma zeolite (Silveira, Filho et al. 2007)	34

Figura 3.4 - Esquema de produção do betume espuma (Wirtgen 2004)	35
Figura 3.5 - Esquema do processo utilizado na produção betume-espuma pelo método da Wam-foam®	36
Figura 3.6 – Duplo tambor cilíndrico (Astecinc 2010)	37
Figura 3.7 - Esquema da primeira variante utilizada na produção de misturas com espuma (adaptado D’Angelo et al. 2008)	37
Figura 3.8 - Esquema da segunda variante utilizada na produção de misturas com espuma (adaptado D’Angelo et al. 2008)	38
Figura 3.9 - Esquema da terceira variante utilizada na produção de misturas com espuma (adaptado D’Angelo et al. 2008)	39
Figura 3.10 - Injecção do betume espuma numa central betuminosa (D’Angelo et al. 2008)	40
Figura 3.11 - Aplicação de uma mistura betuminosa produzida com LT-Asphalt (Nynas 2010).....	41
Figura 3.12 - Aditivo inserido directamente na linha de alimentação do betume (Gandara 2010).....	42
Figura 3.13 - Amostra de Rediset™ utilizado neste trabalho – foto do autor.....	43
Figura 3.14 - Amostra do Cecabase® utilizado neste trabalho – foto do autor	44
Figura 3.15 - Diferentes formas de Sasobit® (Shaw 2008).....	46
Figura 3.16 - Injecção directa do Sasobit® no misturador (Shaw 2008)	46
Figura 3.17- Comparação da resistência à deformação com Licomont® BS 100 (Clariant 2007).....	48
Figura 3.18 - Países onde foram já utilizadas MBT (Beuving 2008)	49
Figura 4.1 - Penetrómetro semi-automático e cápsula de ensaio (Laboratório da Probigalp – foto do autor)	55
Figura 4.2 - Guias, anéis e esferas utilizados (Laboratório da Probigalp – foto do autor) ..	56
Figura 4.3 - Ensaio de determinação da temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola (Laboratório da Probigalp – foto do autor)	57
Figura 4.4 – Ductilímetro e molde para efectuar o ensaio da recuperação elástica (Laboratório da Probigalp – foto do autor).....	57
Figura 4.5 - Equipamento utilizado no método RTFOT e o copo (Laboratório da Probigalp – foto do autor)	59

Figura 4.6 - Equipamento utilizado na determinação da viscosidade dinâmica (Laboratório da Probigalp – foto do autor)	60
Figura 4.7 - Tubo usado na estabilidade de armazenamento (foto do autor)	60
Figura 4.8 - Amostras de Cecabase [®] e do Rediset TM WMX (foto do autor)	62
Figura 4.9 - Método utilizado para a mistura dos betumes com os aditivos (Laboratório da Probigalp – foto do autor).....	64
Figura 4.10 - Variação percentual da temperatura de amolecimento e penetração com 0,10% Cecabase [®]	65
Figura 4.11 - Imagens ao microscópio das amostras aos 45, 60 e 150 minutos, com uma ampliação de 10x	66
Figura 4.12 - Viscosidade das amostras B35/50 com 0,10% Cecabase [®]	67
Figura 4.13 - Variação percentual da temperatura de amolecimento e penetração com 0,15% Cecabase [®]	69
Figura 4.14 - Viscosidade das amostras B35/50 com 0,15% Cecabase [®]	69
Figura 4.15 - Viscosidade das amostras B35/50 com 0,20% Cecabase [®]	71
Figura 4.16 - Viscosidades das amostras B35/50 com 0,30% Cecabase [®]	73
Figura 4.17 - Variação percentual da temperatura de amolecimento e penetração com 1,0% Rediset TM WMX	76
Figura 4.18 - Viscosidade das amostras B35/50 com 1,0% Rediset TM WMX	77
Figura 4.19 - Viscosidade das amostras B35/50 com 1,5%, 2,0% e 3,0% de Rediset TM WMX	79
Figura 4.20 – Viscosidade das amostras do BBM 35/50 com 0,10 e 0,15% de Cecabase [®]	83
Figura 4.21 - Viscosidade das amostras do BBM 35/50 com 0,20 e 0,30% de Cecabase [®]	83
Figura 4.22 - Viscosidade das amostras do BBM 35/50 com 1,0 e 1,5% de Rediset TM WMX	85
Figura 4.23 - Viscosidade das amostras do BBM 35/50 com 2,0 e 3,0% de Rediset TM WMX	85
Figura 4.24 - Viscosidade das amostras B10/20 com Cecabase [®]	88
Figura 4.25 - Viscosidades das amostras B10/20 com Rediset TM WMX	90
Figura 4.26 – Resultados da penetração e da temperatura de amolecimento	92
Figura 4.27 - Variação da massa dos ligantes após RTFOT	93
Figura 4.28 - Resultados da penetração e da temperatura de amolecimento.....	95

Figura 4.29 - Variação da massa dos ligantes após RTFOT	96
Figura 4.30 – Valores da recuperação elástica dos ligantes	97
Figura 5.1 – Curvas granulométricas dos agregados analisados	102
Figura 5.2 - Peneiros utilizados para o achatamento e o paquímetro para a forma (equipamento do Laboratório da Probigalp).....	103
Figura 5.3 - Curva granulométrica da mistura e os limites para MBAM.....	106
Figura 5.4 - Preparação e equipamento de compactação das misturas (equipamento do Laboratório da Probigalp).....	107
Figura 5.5 - Variação das espessuras dos provetes.....	108
Figura 5.6 – Aspecto dos provetes	109
Figura 5.7 - Vista geral dos equipamentos utilizados na determinação das baridades máximas teóricas (Laboratório da Probigalp).....	110
Figura 5.8 - Influência da variação do ligante nas propriedades das misturas	111
Figura 5.9 – Temperaturas de mistura e compactação utilizadas	113
Figura 5.10 – Misturadora com manta de aquecimento utilizada (Laboratório do departamento de Engenharia Civil da Universidade Aveiro – foto do autor)	114
Figura 5.11 - Variação média de espessuras das séries de provetes.....	116
Figura 5.12 – Variação média das baridades	118
Figura 5.13 – Média das deformações obtidas para cada série	120
Figura 5.14 - Média das cargas de rotura obtidas para cada série	120
Figura 5.15 – Agregados de origem calcária utilizados neste trabalho	121
Figura 5.16 - Variação de espessura para cada percentagem de aditivo	122
Figura 5.17 – Equipamento do ensaio de Marshall (Laboratório do departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro – foto do autor)	125
Figura 5.18 – Influência na variação da temperatura para uma MBAM com 2,0% Rediset™	126
Figura 5.19 – Influência na variação da temperatura para uma MBAM com 1,5% Rediset™	127
Figura 5.20 – Influência na variação da temperatura para uma MBAM com 1,0% Rediset™	128

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Caracterização das emulsões (Costa R. M. 2001)	17
Tabela 2.2 - Alguns exemplos de polímeros usados nos betumes modificados.....	21
Tabela 2.3 - Tipos de fibras	25
Tabela 3.1 - Alguns processos e aditivos utilizados na produção MBT (Adaptado de Vaitkus, Čygas et al. 2009)	33
Tabela 3.2 - Temperaturas limite de misturas (EN13108-1 2006).....	50
Tabela 4.1 - Valores de referência da qualidade dos betumes utilizados.....	54
Tabela 4.2 - Valores obtidos na caracterização dos betumes.	61
Tabela 4.3 - Resultados obtidos para B35/50 com 0,10% de Cecabase®	65
Tabela 4.4 - Resultados obtidos para B35/50 com 0,15% de Cecabase®	68
Tabela 4.5 - Resultados obtidos para B35/50 com 0,20% de Cecabase®	70
Tabela 4.6 - Resultados obtidos para B35/50 com 0,30% de Cecabase®	72
Tabela 4.7 - Estabilidade de armazenamento do B35/50 com Cecabase®	74
Tabela 4.8 - Resultados obtidos para B35/50 com 1,0% de Rediset™ WMX.....	76
Tabela 4.9 - Resultados obtidos para o B35/50 com 1,5%, 2,0% e 3,0% de Rediset™ WMX.....	78
Tabela 4.10 - Estabilidade de armazenamento do B35/50 com Rediset™ WMX	80
Tabela 4.11 - Resultados obtidos para o BBM 35/50 com Cecabase®	82
Tabela 4.12 - Resultados obtidos para o BBM 35/50 com Rediset™ WMX.....	84
Tabela 4.13 - Resultados obtidos para B10/20 com Cecabase®	87
Tabela 4.14 - Resultados obtidos para B10/20 com Rediset™ WMX.....	89
Tabela 5.1 - Massas volúmicas dos agregados	103
Tabela 5.2 - Características dos agregados.....	104
Tabela 5.3 – Resultados da análise granulométrica.....	105
Tabela 5.4 – Medições dos provetes.....	108
Tabela 5.5 – Limites das propriedades de uma MBAM.....	110
Tabela 5.6 - Dimensões dos provetes com Rediset™ WMX	115
Tabela 5.7 – Propriedades dos provetes com Rediset™ WMX	117
Tabela 5.8 – Cargas e deformações obtidas no ensaio de Marshall	119
Tabela 5.9 – Baridades hidrostáticas e geométricas	124

Tabela 5.10 - Porosidades e VMA dos provetes	124
Tabela 5.11 – Resumo das temperaturas finais	129

ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA

AASTHO	American Association of State Highway and Transport Official
AI	Asphalt Institute
APP	Polipropileno atático
ASTM	American Society of Testing and Materials
BS	British Standard
B 10/20	Betume 10/20
B 35/50	Betume 35/50
BBM 35/50	Betume com borracha 35/50
CAIR	Cleam Air Interstate Rule
CEN	Comité Européen de Normalisation
EPDM	Etileno-propileno-dieno
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EBA	Etileno-butilo-acrilato
EN	European Standard
EMA	Etileno-metilo-acrilato
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EVA	Etileno-vinil-acetato
FHWA	Federal Highway Administration
IIR	Isobutileno-isopreno
IR	Poliisopreno
LCC	Líquido da castanha de caju
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MBAM	Mistura Betuminosa de Alto Módulo
MBQ	Misturas Betuminosas a Quente
MBT	Misturas Betuminosas Temperadas
NP	Norma Portuguesa
PBD	Polibutadieno
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PRN 1985	Plano Nacional Rodoviário de 1985
PRN 2000	Plano Nacional Rodoviário de 2000

PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinil
RTFOT	Rolling thin film oven test
SBR	Estireno-butadieno
SBS	Estireno-butadieno-estireno
SEBS	Estireno-etileno-butileno-estireno
SIS	Estireno-isopreno-estireno
TEV	Temperatura de equi-viscosidade
WMA	Warm Mix Asplaht

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A implementação do Plano Rodoviário Nacional de 1985 (PRN 1985) promoveu a modernização da rede rodoviária nacional, através da construção de itinerários principais e complementares. Contudo, o crescimento do tráfego pesado levou a um consequente aumento das solicitações impostas nos pavimentos rodoviários. Este facto, acrescido da frequente inadequada formulação das misturas betuminosas, levou à rápida deterioração dos pavimentos rodoviários. De modo a combater este problema, o Plano Rodoviário em vigor, Plano Rodoviário Nacional de 2000 (PRN 2000), prevê não só o crescimento da Rede Rodoviária Nacional, mas também o aumento de qualidade estrutural e funcional dos pavimentos existentes, ou seja, a reabilitação dos mesmos.

Relativamente à formulação das misturas betuminosas, actualmente a tendência é para recorrer-se à utilização de métodos racionais. A caracterização da mistura é elaborada com base em ensaios mecânicos, nomeadamente a determinação das deformações permanentes e da resistência à fadiga, simulando de uma forma mais realista as acções num pavimento durante o seu tempo de vida útil. Esta metodologia tem apresentado melhores resultados em comparação com os métodos empíricos, método de Marshall, até há pouco tempo dominante.

A correcta caracterização dos componentes das misturas betuminosas (os agregados, o fíler e o ligante betuminoso) é um passo importante para a correcta formulação das misturas betuminosas, garantindo uma capacidade de resposta às exigências impostas pelo tráfego.

Os ligantes betuminosos apesar de representarem uma pequena fracção do volume das misturas betuminosas, são o seu componente mais importante. As suas propriedades de adesividade e visco-elásticas permitem a junção dos agregados, aumentando a capacidade de resistência do pavimento às acções do tráfego.

Na última década tem existido um aumento da utilização de agentes modificadores dos ligantes: plastómeros, elastómeros, fibras, borrachas, entre outros; contribuindo para um aumento de vida útil dos pavimentos, redução do ruído entre os pneus e o pavimento,

redução da susceptibilidade aos agentes climatéricos, aumento da resistência às acções do tráfego, e aumento do tempo de vida útil do pavimento.

Consciente de que os recursos naturais existentes não são inesgotáveis, é necessário encontrar novas soluções que conduzam à eficiência energética, contribuindo para a diminuição do uso dos combustíveis fósseis e garantindo, deste modo, um equilíbrio entre fontes e consumos. No ano de 1999, o protocolo de Quioto surge como uma realidade e um impulsionador na busca de novas tecnologias para a produção e aplicação das misturas betuminosas. A redução dos gases emitidos para a atmosfera e os custos energéticos são as principais preocupações deste protocolo.

No sector rodoviário as misturas betuminosas temperadas (MBT) apresentam-se como uma solução inovadora, com a principal vantagem de diminuir as temperaturas de fabrico entre 30 a 40%, com conseqüente diminuição das emissões gasosas e redução do consumo energético durante a produção. As misturas podem ser obtidas através da aplicação de betumes espuma, de aditivos químicos ou de aditivos orgânicos.

As MBT apresentam durante a fase de mistura uma diminuição dos gases emitidos para o ambiente e do combustível gasto. Na fase de compactação garantem a manutenção da viscosidade a temperaturas reduzidas assim como a diminuição dos gases emitidos. As misturas à base de betume espuma além das propriedades referidas, permitem também o transporte a longas distâncias e a aplicação a temperaturas atmosféricas inferiores.

Apesar do governo dos Estados Unidos ter assinado mas não ratificado o Protocolo de Quioto, algumas empresas e Estados empenharam-se no desenvolvimento de novas tecnologias com vista à redução dos efeitos mencionados. Em Março de 2005 a Agência de protecção ambiental emitiu o *Cleam Air Interstate Rule* (CAIR), que visa à redução do dióxido de enxofre (SO₂) e nitrogénio óxido (NO_x) em 28 Estados do Leste e do distrito de Columbia. Devido às metas impostas pelo CAIR, as centrais betuminosas vêem o seu tempo de funcionamento ser reduzido ou são mesmo encerradas, durante determinados períodos do ano (D'Angelo et al. 2008).

Em Maio de 2007, um grupo de americanos visitaram quatro países Europeus (Bélgica, França, Alemanha e Noruega), para avaliarem e discutirem as diferentes tecnologias utilizadas na redução da temperatura das misturas betuminosas a quente. Estes elementos faziam-se representar agências governamentais (*American Association of State Highway*

and Transport Official - AASHTO), privadas (*Federal Highway Administration - FHWA*) e consultores. O objectivo desta visita foi a troca de informações sobre as tecnologias utilizadas na Europa e Estados Unidos, com o particular interesse pelo comportamento dos pavimentos a longo prazo (D'Angelo et al. 2008).

Actualmente, ainda se colocam algumas questões na utilização de misturas betuminosas temperadas, nomeadamente acerca dos processos utilizados, dos materiais, dos procedimentos adoptados, das diferenças para com as misturas convencionais, do comportamento das misturas à fadiga, à deformação, das classes de tráfego a que podem ser sujeitas, dos benefícios, entre outros.

1.2. Objectivos

O presente trabalho surge de uma parceria entre o Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e a Probigalp - Ligantes Betuminosos S.A.

O principal objectivo é a verificação da compatibilidade entre os aditivos e os betumes da Probigalp, de forma a contribuírem para a implementação das misturas betuminosas temperadas a nível nacional.

No presente estudo propõe-se caracterizar o ligante utilizado para o fabrico das misturas betuminosas temperadas e demonstrar que o seu desempenho na mistura com o aditivo não é afectado.

Para o efeito, estudaram-se os seguintes betumes: betume duro, de penetração 10/20, modificado com borracha de penetração nominal 35/50 e betume convencional de penetração 35/50 antes e após aditivação, relativamente às características penetração, temperatura de amolecimento, viscosidade e recuperação elástica. As características penetração, temperatura de amolecimento e a perda de massa serão também estudadas após envelhecimento acelerado.

Por fim, propõe-se a caracterização e análise do comportamento de uma mistura betuminosa de alto módulo com betume aditivado com Rediset™.

1.3. Conteúdo da tese

No capítulo 2 faz-se uma revisão dos ligantes betuminosos utilizados na pavimentação rodoviária. Abordando-se as diferenças entre os betumes naturais, alcatrão, betumes puros, betumes fluidificados e as emulsões betuminosas. Distinguem-se os diversos materiais utilizados na modificação dos betumes base, como por exemplos os polímeros, as fibras, a borracha e os aditivos químicos.

No capítulo 3 descreve-se a importância da aplicação das misturas betuminosas temperadas e os factores resultantes da sua aplicação. Apresentam-se os diferentes tipos de aditivos e os processos utilizados para a obtenção da redução das temperaturas de mistura e compactação. Explicam-se também as diferenças, as vantagens e o modo de aplicação de cada método.

No capítulo 4 descreve-se o procedimento experimental adoptado e os ensaios realizados na caracterização do betume. São apresentados os resultados dos ensaios para os ligantes de gama de penetração 10/20, 35/50 e modificado 35/50, para as diferentes percentagens de Cecabase[®] e RedisetTM.

No capítulo 5 efectua-se a caracterização dos agregados e a metodologia de análise para cada ensaio. Neste capítulo é ainda definido um tipo de mistura betuminosa com os agregados caracterizados e a determinação o teor óptimo de betume. Por fim, realiza-se um estudo do comportamento da mistura com diferentes percentagens de RedisetTM, e faz-se a sua análise, estudando a influência do aditivo a diferentes temperaturas de produção e compactação.

No capítulo 6 resumem-se as principais conclusões obtidas na realização deste trabalho, perspectivando-se o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Capítulo 2

LIGANTES BETUMINOSOS

2. LIGANTES BETUMINOSOS

Os ligantes correspondem a uma percentagem baixa no volume de uma mistura betuminosa. As suas propriedades de adesividade que permite a junção entre os agregados e o aumento da capacidade resistente nas solicitações causadas pelo tráfego rodoviário, fazem deste o material mais importante nos pavimentos.

Os ligantes betuminosos podem ser encontrados na forma natural, asfalto ou rocha asfáltica, ou obtidos da destilação do petróleo bruto, betume, e da destilação da hulha, alcatrão.

2.1. Betumes naturais

- **Asfaltos naturais**

O asfalto é um líquido pegajoso, semi-sólido, de cor escura e de grande viscosidade. É conhecido por encontrar-se em alguns depósitos naturais sob a forma de ‘lagos’ (Figura 2.1), como acontece em Trindade e Tobago (Bermudas), Guanoco (Venezuela) e na região de Ambrizete (Angola).

A extracção do material é efectuada por escavação mecânica. O asfalto extraído é constituído por 53 a 55% de betume asfáltico, de 35 a 37,5% de matéria mineral (inclui a sílica, alumina, óxido de ferro, entre outros), de 4,3% de água e 3,2% de matéria orgânica.

Este material é refinado a uma temperatura de 160 °C para a remoção da água e passa por uma série de filtros para a remoção de matéria vegetal.



Figura 2.1 - Lago de Trindade e Tobago (Sciencelay 2010)

- **Rocha asfáltica**

A rocha asfáltica (figura 2.3) foi um dos primeiros produtos betuminosos a ser aplicado na pavimentação rodoviária. Aparece na natureza por impregnação do betume em rochas calcárias, argilosas ou arenosas. Este fenómeno ocorre devido a uma destilação lenta do petróleo que outrora envolvia a rocha.

A rocha asfáltica surge nas regiões de Grad (França), Ragusa (Itália), Neuchâtel (Suíça) com a presença 12% de betume e nas regiões de Ambriz e Ambrizete em Angola com 30% de betume relativamente à sua massa total.

A rocha asfáltica depois de ser triturada era aquecida (figura 2.2) compactada no local.



Figura 2.2 - Aquecimento da rocha asfáltica (IN.gov, 2009)



Figura 2.3 - Amostra de rocha asfáltica em pó (cortesia da Probigalp – foto do autor)

Actualmente, deixou de ser utilizada directamente para a pavimentação rodoviária ou aplicações industriais.

2.2. Alcatrão

Os termos, alcatrão e betume, são frequentemente confundidos devido à sua semelhança de propriedades e aparência. As diferenças surgem na forma de obtenção, o betume é obtido da destilação do crude de petróleo, enquanto o alcatrão é obtido através de um processo de destilação destrutiva de combustíveis sólidos, madeira ou carvão.

A utilização do alcatrão em Portugal restringe-se ao período da II Guerra mundial, face à escassez do betume asfáltico, enquanto em Inglaterra a utilização já foi mais intensa, tendo sido criada a norma British Standard BS 76 que inclui oito tipos de “alcatrão” para a pavimentação rodoviária, desde o de 30°C de temperatura de equi-viscosidade (TEV) até ao de 58 °C de TEV, com incrementos de 4 °C (Picado-Santos et al. 2006). O alcatrão com maior índice de viscosidade é utilizado em pavimentos sujeitos a tráfego pesado. O alcatrão oferece uma maior adesão ao agregado e confere uma maior resistência ao ataque de combustíveis em relação ao betume.

Devido ao elevado incremento dos betumes e sendo o alcatrão classificado como uma substância cancerígena, a sua aplicação decresceu drasticamente nos últimos anos.

2.3. Betumes puros

De todos os betumes conhecidos, os betumes puros ainda são os mais utilizados na pavimentação rodoviária. O betume é um material muito viscoso, quase sólido à temperatura ambiente, adesivo e impermeável à água. É constituído por uma mistura química complexa em que predominam os hidrocarbonetos, por quantidade reduzida de grupos heterocíclicos estruturalmente análogos e por grupos funcionais que contêm átomos de enxofre, nitrogénio e oxigénio. Ainda é possível encontrar vestígios de metais, como o vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio que ocorrem na forma de sais inorgânicos e óxidos ou em estruturas porfirina (Silva 2005).

Numa análise elementar efectuada a diversos betumes obtidos de vários depósitos de petróleo, obtiveram-se os seguintes valores para a composição química (Read, Whiteoak et al. 2003):

Carbono 82 a 88%

Hidrogénio 8 a 11%

Enxofre 0 a 6%

Oxigénio 0 a 1,5%

Nitrogénio 0 a 1%

A composição química varia consoante a origem e o tratamento efectuado na obtenção do betume, o qual se pode enquadrar em dois grupos bastante distintos, os asfaltenos e os maltenos, este último pode ser subdividido em três fracções: nos saturados, nos aromáticos e nas resinas. A respectiva divisão não se encontra bem definida, podendo alguns enquadrar-se em mais do que um grupo.

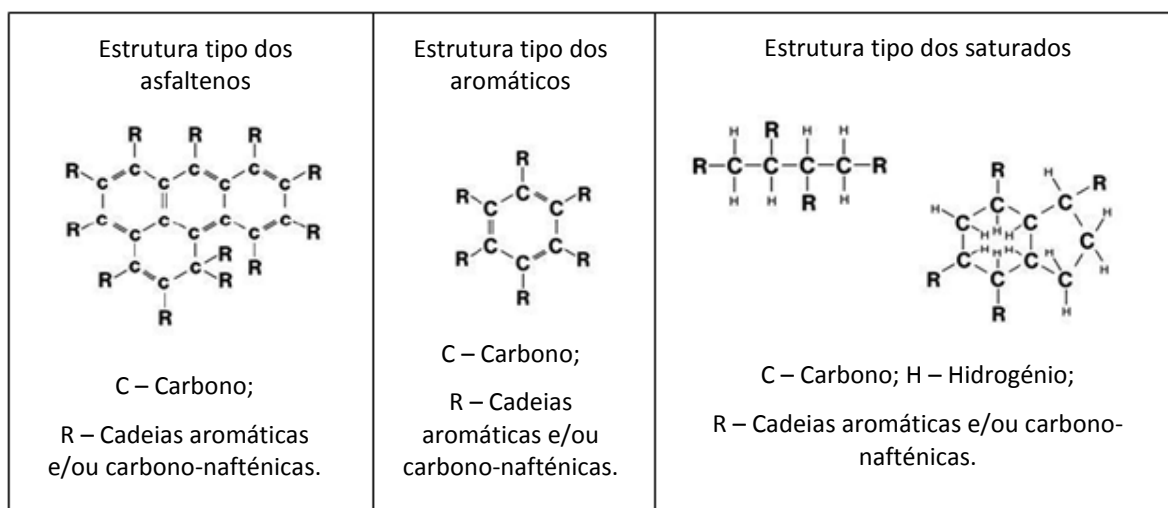


Figura 2.4 - Estrutura química tipo dos asfaltenos, aromáticos e saturados (adaptado de Silva 2005)

Os asfaltenos, representados na figura 2.4, são sólidos amorfos insolúveis em heptano normal, apresentando-se numa cor preta ou castanha, considerados geralmente materiais aromáticos complexos, altamente polarizados. Para além do carbono e hidrogénio na sua constituição, também possuem azoto, oxigénio e enxofre. No que diz respeito ao peso molecular, existem vários métodos para a sua determinação, variando o mesmo entre 600 e 300000. Em média, os valores obtidos apresentam uma maior concentração no intervalo de 1000 a 100000. As partículas apresentam-se com um tamanho entre os 5 e 30 nanómetros, correspondendo ao intervalo de 5 a 25% da composição do betume (Read, Whiteoak et al. 2003).

Quanto maior a concentração dos asfaltenos maior a dureza do betume, ou seja, menor é a penetração, implicando num aumento do ponto de amolecimento e da viscosidade.

As resinas são constituídas principalmente por carbono e hidrogénio, apresentando pequenas quantidades de azoto, oxigénio e enxofre. São solúveis em heptano normal, apresentando-se numa cor castanha escura, num estado sólido ou semi-sólido e bastante polarizadas. Distinguem-se pela forte capacidade de aderência ao agregado devido à sua polaridade. As resinas separadas do betume apresentam um peso molecular na ordem dos 500 a 50000 e uma dimensão das partículas entre os 1 e 5 nanómetros. São agentes dispersivos ou peptizantes para os asfaltenos em que a proporção entre as resinas e os asfaltenos condicionam o betume, tipo solução (SOL) ou gelatinoso (GEL) (Read, Whiteoak et al. 2003).

Os aromáticos (figura 2.4) apresentam um peso molecular da ordem dos 300 a 2000 e representam a maior proporção do meio dispersante dos asfaltenos (Picado-Santos et al. 2006). Consistem em cadeias de carbono não polares, denominadas de estruturas de anéis não saturados. Devido à estrutura apresentada, possuem uma grande capacidade na decomposição de outras moléculas como hidrocarbonetos de elevado peso molecular. São os principais constituintes do betume, entre 40 a 65% (Read, Whiteoak et al. 2003).

Os saturados são constituídos por cadeias de hidrocarbonetos lineares e/ou ramificadas (figura 2.4) solúveis no heptano normal. São óleos viscosos não polarizados de cor clara. Com um peso molecular semelhante ao grupo dos aromáticos e constituem 5% a 20% da estrutura do betume (Read, Whiteoak et al. 2003).

Já foram usados vários modelos para descrever a estrutura do betume mas o que melhor caracteriza é um sistema coloidal, que consiste numa dispersão de micelas de asfaltenos de elevado peso molecular, num meio oleoso de menor peso molecular, de maltenos.

O betume pode apresentar-se numa estrutura com aspecto de solução (SOL) ou gelatinoso (GEL). O aspecto deve-se à quantidade de resinas e aromáticos com capacidade dispersiva, permitindo a boa ou fraca peptização dos asfaltenos, resultando uma boa ou fraca mobilidade das micelas dentro do betume (Read, Whiteoak et al. 2003).

A quantidade de asfaltenos e a sua dispersão influencia a reologia do betume e, o seu aumento endurece o betume, reduzindo a penetração e a susceptibilidade ao corte, aumentando a viscosidade deste. O aumento da temperatura resulta numa rotura das ligações de hidrogénio dos asfaltenos reduzindo a viscosidade. A diminuição da temperatura resulta no oposto.

Durante o tempo de vida útil de um pavimento, o betume vai sofrendo alterações na sua composição devido ao seu envelhecimento. A figura 2.5 demonstra o aumento do índice de envelhecimento na fase de mistura, de compactação e durante o tempo de serviço do pavimento, assim como a variação de composição do betume.

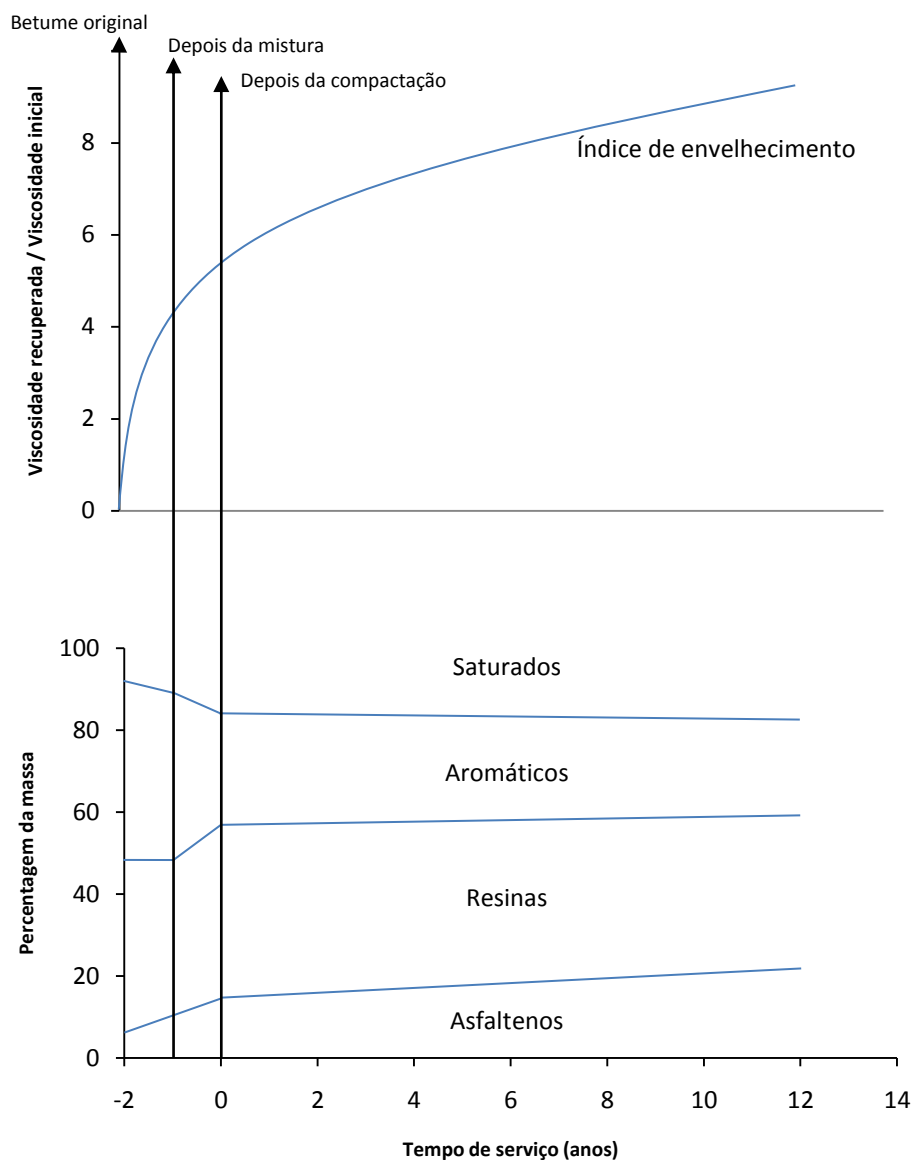


Figura 2.5 - Variação da composição e envelhecimento de um betume asfáltico durante a fase de mistura, compactação e durante o tempo de serviço (Adaptado de Read, Whiteoak et al. 2003)

2.4. Betumes fluidificados (*cut-back*)

O betume asfáltico apresenta uma diminuição de viscosidade quando sujeito a um aumento de temperatura, classificando-se como um material termoplástico.

À temperatura ambiente apresenta-se num estado semi-sólido, havendo necessidade em fluidificá-lo (com um dissolvente volátil) na pavimentação rodoviária. O aumento da

fluidez permite uma maior facilidade do manuseamento em actividades como regas de colagem entre as camadas betuminosas e impregnações de camadas granulares a temperaturas muito inferiores às utilizadas nos betumes puros.

Para a liquefacção do ligante recorre-se a solventes como petróleo, gasóleo ou gasolina. As percentagens em massa do betume nos betumes fluidificados apresentam valores entre os 50 e 80%, o valor varia consoante o solvente. Após a volatilização do solvente este passa ao seu comportamento de betume normal e verifica-se a ligação dos betumes aos agregados. O tempo que demora para que ocorra a volatilização do solvente pode ser mais ou menos longo, podendo a cura ser do tipo lenta (*slow curing* - SC), média (*medium curing* - MC) e rápida (*rapid curing* - RC), dependendo do tipo de solvente aplicado, gasóleo - SC, petróleo - MC e gasolina - RC. Actualmente a utilização de betumes fluidificados tem vindo a diminuir. A aplicação destes solventes energéticos como solventes do betume asfáltico leva ao desperdício das suas propriedades energéticas. Face ao aumento constante dos custos torna-se dispendiosa, assim como acarreta à libertação de gases poluentes e nocivos para os operários e para o ambiente.

Em Portugal já não se usa por razões ambientais e de segurança. No entanto por vezes recorrem-se aos betumes fluidificados para trabalhos de pavimentação em tempo frio, sobretudo em regas de colagem entre camadas de misturas betuminosas e regas de impregnação betuminosa de bases granulares (MC-30 ou MC-40) (Picado-Santos et al. 2006).

2.5. Emulsões betuminosas

Utilizadas em praticamente todas as obras de pavimentação rodoviária, sendo vulgarmente denominadas de “colas” devido ao facto de serem frequentemente utilizadas na ligação entre as camadas.

Uma emulsão é definida como um sistema heterogéneo de duas fases, composto pela mistura entre dois líquidos imiscíveis em que um deles se encontra disperso na forma de gotículas (dimensões de 0,1 a 5 micra de diâmetro) (Picado-Santos et al. 2006) no seio de outro líquido, formando uma mistura estável.

A aplicação de um emulsionante permite aumentar a estabilidade cinética, tornando a mistura estável e homogénea., impedindo que com o passar do tempo os líquidos imiscíveis se reagrupem.

Quanto à forma, podem caracterizar-se as emulsões como sendo do tipo directas, inversas ou múltiplas (tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Caracterização das emulsões (Costa R. M. 2001)

Directas (L/H)	Tipo aquoso	Fase contínua é água / fase dispersa é o betume
Inversas (H/L)	Tipo betuminoso	Fase contínua é o betume / fase dispersa é a água
Múltiplas (H/L/H)	Tipo misto	Água dispersa em betume por sua vez disperso em água

As emulsões betuminosas podem dividir-se em 4 grupos, emulsões catiónicas, emulsões aniónicas, emulsões não aniónicas e emulsões de argila estabilizada (Read, Whiteoak et al. 2003).

As mais utilizadas são as emulsões aniónicas e as catiónicas, a diferença está relacionada com a carga eléctrica (aniónicas as de carga negativa e catiónicas as de carga positiva) envolvendo as gotículas de betume.

O emulsionante que se posiciona em redor das gotículas de betume cria uma camada de cargas eléctricas (figura 2.6) permitindo uma redução de tensão entre as partículas, aumentando a estabilidade e homogeneização entre as mesmas. Aplica-se o princípio da electrostática, em que partículas com a mesma carga repelem-se e cargas oposta atraem-se.

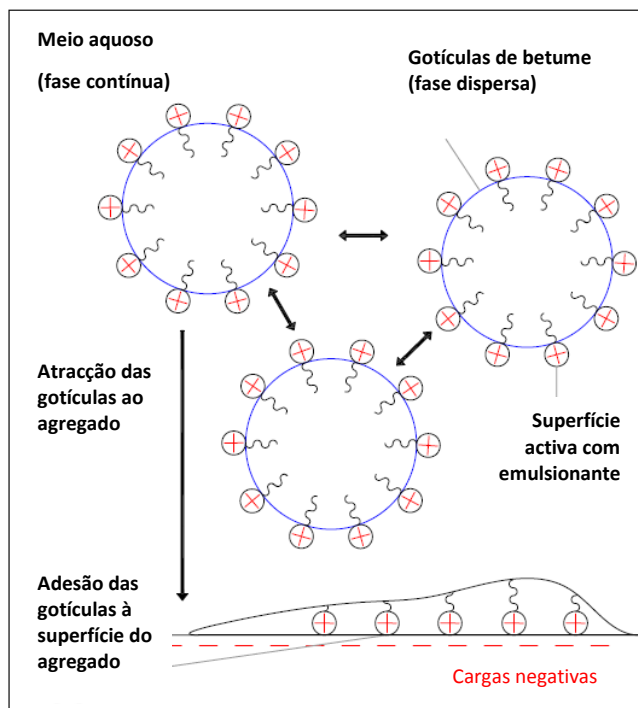


Figura 2.6 - Esquema de adesão do betume ao agregado. (Adaptado de Read, Whiteok et al. 2003)

As cargas que envolvem as gotículas de betume controlam a escolha adequada dos inertes a utilizar com cada tipo de emulsão, ou seja, emulsões aniónicas obrigam à utilização de inertes que se ionizam positivamente (ex: calcário) e emulsões catiónicas à utilização de inertes que se ionizam negativamente (ex: basaltos e granitos).

Nas emulsões catiónicas o emulsionante usado é um sal de amina, concedendo propriedades ácidas ($\text{pH} < 7$). Nas emulsões aniónicas, o emulsionante normalmente utilizado é um sabão alcalino, concedendo propriedades básicas ($\text{pH} > 7$) (Costa R.M. 2001).

As emulsões betuminosas permitem uma diminuição da viscosidade do conjunto betume-emulsionante, obtendo-se uma maior facilidade no manuseamento e podendo ser aplicável em misturas betuminosas a frio, após a aplicação *in situ* verifica-se um aumento de viscosidade compatível com a necessidade de rigidez das camadas produzidas.

As emulsões betuminosas de rotura rápida podem ser aplicadas para revestimentos superficiais, regas de colagem e impregnação de geotêxteis e em misturas betuminosas a frio para o preenchimento de covas e nichos; as emulsões de rotura média para misturas betuminosas a frio; e as de rotura lenta para regas de impregnação, estabilização e para misturas betuminosas a frio.

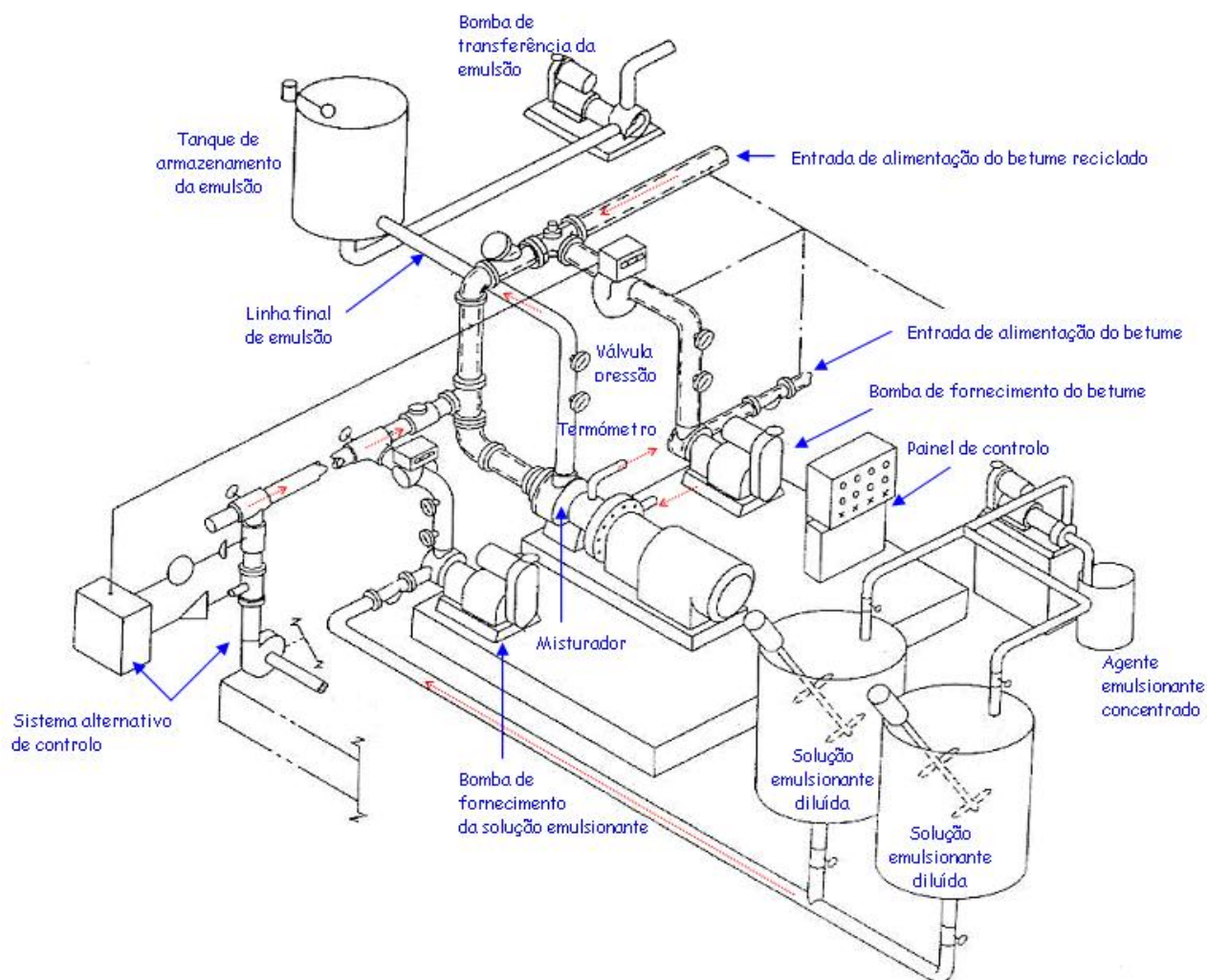


Figura 2.7 - Esquema de uma central de emulsões betuminosas (adaptado Kett I. 1998)

Para a preparação das emulsões betuminosas (figura 2.7), numa primeira fase misturam-se a água e o emulsionante (ácido ou base), sendo esta denominada de fase contínua, em seguida é efectuada a mistura da solução obtida na fase contínua com o betume, fase dispersa, mistura que é efectuada através de um desintegrador coloidal aquecido

(misturador). Por fim a emulsão final é armazenada geralmente em silos à temperatura ambiente.

2.6. Betumes modificados

Perante o aumento das solicitações nos pavimentos rodoviários, a aplicação de aditivos no betume surge como resposta à necessária melhoria das propriedades dos pavimentos. Os aditivos conferem ao betume um melhor comportamento mecânico e reológico, permitindo um aumento de resposta perante as solicitações impostas, maior capacidade resistente perante fenómenos ambientais, menor susceptibilidade à temperatura, melhorias de drenabilidade, diminuição do ruído e aumento de vida útil do pavimento.

2.6.1. Betumes modificados com polímeros

Os betumes modificados com polímeros resultam da adição de polímeros (elastómeros, plastómeros ou termoendurecedores) a betumes asfálticos puros. A adição de polímeros origina a modificação das propriedades reológicas face aos betumes convencionais. A tabela 2.2 apresenta alguns exemplos de polímeros utilizados na modificação de betumes.

A norma europeia EN 14023 - Especificações para betumes modificados com polímeros, estabelece um quadro das características e métodos apropriados de ensaio para os betumes modificados com polímeros (INIR 2010).

Tabela 2.2 - Alguns exemplos de polímeros usados nos betumes modificados

Tipos de aditivos		Exemplos
Polímeros	Termoendurecíveis	Resinas epoxy; Resinas acrílicas; Resinas poliuretano; Resinas fenólicas
	Elastómeros	Estireno-butadieno-estireno (SBS) Estireno-butadieno (SBR) Estireno-isopreno-estireno (SIS) Estireno-etileno-butileno-estireno (SEBS) Etileno-propileno-dieno (EPDM) Isobutileno-isopreno (IIR) Polibutadieno (PBD); Poliisopreno (IR)
	Plastómeros	Etileno-vinil-acetato (EVA) Etileno-metilo-acrilato (EMA) Etileno-butilo-acrilato (EBA) Polipropileno atático (APP) Polietileno (PE); Polipropileno (PP) Policloreto de Vinil (PVC); Poliestireno (PS)

Termoendurecíveis

Surgidos na década de 60, estes polímeros termoendurecíveis são obtidos da reacção química de dois componentes líquidos, um contendo uma resina e um outro, contendo um endurecedor. Uma vez misturados e após cura resultam numa estrutura fortemente indivisível e insolúvel.

A mistura de um betume com polímeros termoendurecíveis apresenta como vantagem uma maior resistência à temperatura. Após a cura apresenta-se como material elástico, sem fluência e de uma elevada resistência aos ataques químicos, óleos, combustíveis, diluentes, e outros. A desvantagem é o reduzido tempo de aplicabilidade (reduzido tempo de cura), quanto mais elevada a temperatura menor é o tempo disponível para a aplicação.

São utilizados principalmente na pavimentação de aeroportos e pontes.

O estudo efectuado por Meltem Çubuk, Metin Gürü e M. Kürşat Çubuk da Universidade de Gazi (Turquia), com o tema “*Improvement of bitumen performance with epoxy resin*” conclui que os betumes modificados com resinas podem ser recomendados para serem aplicados em climas quentes, em pavimentos sujeitos a tráfego pesado e na reparação dos

pavimentos fissurados. Apresentando um baixo custo de aplicação e uma menor necessidade de manutenção (Çubuk, M. et al. 2009).

Elastômeros

Os elastômeros apresentados na tabela 2.2 podem dividir-se em 4 subgrupos, os poliuretanos, os copoliésteres, os poliolefínicos e os copolímeros em blocos de estireno.

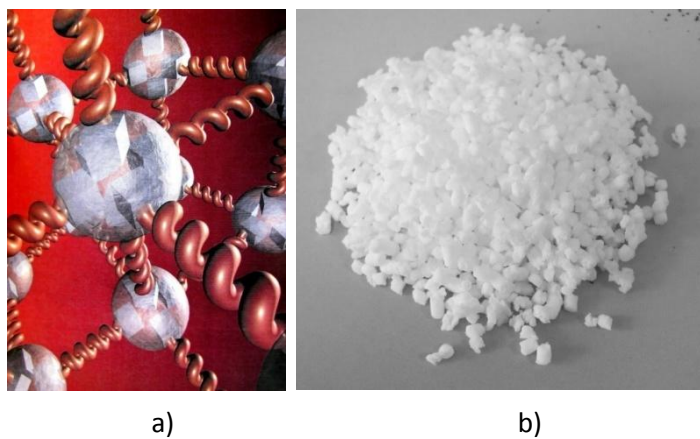


Figura 2.8 – a) Esquema tridimensional da estrutura de um elastômero (Read, Whiteoak et al. 2003)

b) Amostra de SBS utilizado na modificação do betume (cortesia da Probigalp – foto do autor)

Os copolímeros em blocos de estireno são os que apresentam um maior potencial de melhoria nos betumes, do qual fazem parte os SBS (figura 2.8), SIS e SEBS.

A adição de elastômeros confere um aumento do ponto de amolecimento e redução da penetração. Verifica-se ainda um aumento da flexibilidade e ductilidade a baixas temperaturas face aos betumes convencionais. As misturas betuminosas de betumes modificados com elastômeros apresentam um aumento da resistência à fadiga, um aumento da resistência à deformação permanente e ao envelhecimento nas misturas betuminosas.

A qualidade do betume modificado depende:

- Tipo de polímero;
- Composição e estrutura do betume;
- Concentração do polímero;
- Do processo envolvente no fabrico da mistura (temperatura, tempo de mistura e forma de mistura);

A grande diferença de densidade molecular pode provocar a sedimentação de um dos materiais usados.

Na escolha do betume deve ser contemplado o tipo de polímero, a composição química do betume, que pode combinar melhor com um tipo de polímeros, e a penetração.

Um elevado grau de concentração implica um aumento de custo final da mistura betuminosa. A partir dos 8% de incorporação, pode dar-se uma inversão de fase, passando a estar o betume disperso no polímero (Costa R.M. 2001).

A temperatura, o tempo de mistura e a forma de mistura, são pormenores de elevada importância para a obtenção de uma mistura homogénea.

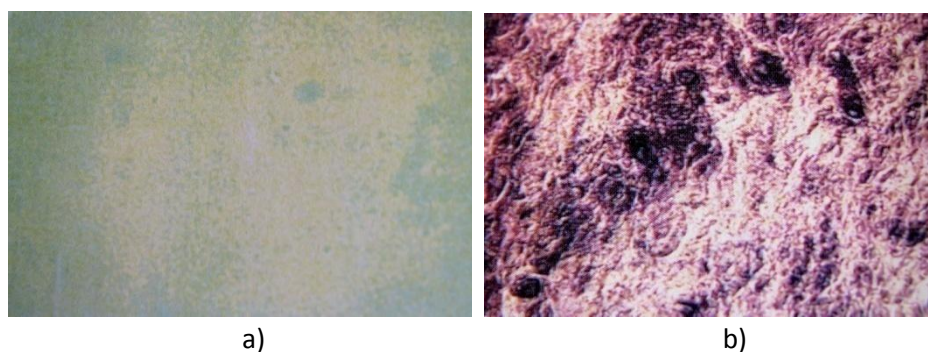


Figura 2.9 - Imagens microscópicas da interação do betume/polímero, a) compatível e b) incompatível (Read, Whiteoak et al. 2003)

Um dos principais problemas na elaboração de betumes modificados com elastómeros surge no armazenamento a altas temperaturas. A baixa compatibilidade entre o polímero e o betume resulta numa baixa estabilidade, provocando a sua separação (Isaccson et al.

1999). A utilização de aditivos tais como enxofre ou óleos aromáticos, como por exemplo o líquido da castanha de caju (LCC), permitem melhorias na estabilidade do armazenamento do betume modificado. A adição de LCC a um betume modificado com SBS mostrou um efeito positivo na estabilidade de armazenamento, conferindo uma boa estabilidade coloidal e minimizando a separação das fases dos componentes da mistura (Rodrigues et al. 2009).

A figura 2.9 apresenta uma estrutura contínua, verificando-se uma homogeneização entre o ligante/elastômero e, uma estrutura descontínua em que existe uma incompatibilidade do ligante com o elastômero (Read, Whiteoak et al. 2003).

Plastômeros

De todos os plastômeros enunciados na tabela 2.2, o copolímero de etileno-vinil-acetato (figura 2.10) é o mais utilizado na modificação do betume. A adição de plastômeros no betume traduz um aumento de viscosidade à temperatura ambiente. No entanto, os plastômeros não proporcionam um aumento significativo da elasticidade do betume, ou seja mantêm a mistura rígida, quando aquecido pode resultar na separação do ligante/plastômero, resultando numa dispersão grosseira no arrefecimento (Picado-Santos et al. 2006).

Este tipo de polímeros têm sido utilizados na construção de estradas há mais de 20 anos, permitindo um melhor manuseamento durante a fase de construção e a resistência à deformação durante a fase de serviço.



Figura 2.10 - Amostra de EVA utilizado na modificação do betume (cortesia da Probitalp – foto do autor)

Apesar de investigações consideráveis na determinação do melhor polímero para a modificação do betume, ainda existe muito por descobrir devido à complexa natureza e interação do betume e polímeros (Gonzalez, Munoz et al. 2004).

O problema de armazenamento dos betumes modificados com plastómeros é o mesmo que se encontra nos modificados com elastómeros, em que existe a necessidade da utilização de aditivos (por exemplo o enxofre) para que não ocorra a separação entre o betume e o agente modificador.

Na figura 2.11 apresentam-se imagens microscópicas obtidas de um betume modificado com 3% de EVA, logo após a realização da mistura e 24 horas depois.

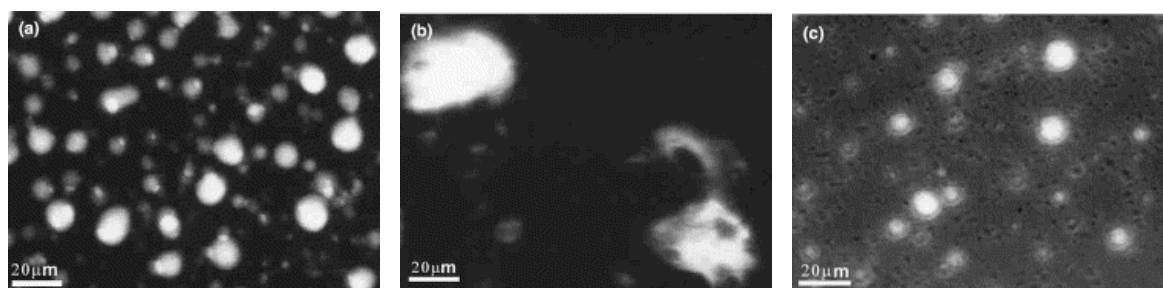


Figura 2.11 - Imagens microscópicas do betume com EVA [a) Após efectuada a mistura, b) Face superior do provete, passado 24h de efectuada a mistura e armazenado a 165°C, c) Face inferior do provete, passado 24h de efectuada a mistura e armazenado a 165°C] (Gonzalez, Munoz et al. 2004)

2.6.2. Fibras

As fibras associam-se ao ligante, geralmente no estado puro, para aumentar a capacidade resistente das misturas betuminosas e o tempo de vida das mesmas. A junção ligante/fibra ocorre de uma forma física e não química, devido à sua superfície alongada e às suas qualidades de interface, as fibras podem fixar o ligante sem risco de fluência (Picado-Santos et al. 2006).

As fibras podem dividir-se quanto ao tipo e à sua origem, em(tabela 2.3):

Tabela 2.3 - Tipos de fibras

Naturais	Asbestos (amianto) Celulose	
Químicas	Sintéticas	Polipropileno Poliéster Polietileno Acrílico
	Inorgânicas	Vidro Rocha Metálicas

As fibras naturais e inorgânicas não se alteram quando misturas com o ligante a temperaturas elevadas, enquanto as fibras sintéticas, termoplásticas, encontram-se restringidas quanto à temperatura de aplicação. O poliéster apresenta um elevado ponto de liquefacção, próximo 220°C, já o polietileno e polipropileno possuem um baixo ponto de liquefacção não sendo aplicados em misturas a quente. (Homem 2002)

2.6.3. Modificadores químicos

Os modificadores químicos, onde o enxofre se insere, são geralmente utilizados como estabilizadores nas misturas armazenadas e na modificação de betumes para preenchimento de covas.

Para grandes concentrações de enxofre é possível tornar a mistura muito trabalhável e estável, a redução de viscosidade torna assim a mistura como que virtualmente auto-compactável, após a cura, apresenta-se com uma boa capacidade de resistência à deformação.

O principal problema na aplicação deste material ocorre para temperaturas acima dos 150°C, para estas temperaturas ocorre a emissão de sulfureto de hidrogénio (H₂S), o que obriga à utilização de equipamentos especiais (Read, Whiteoak et al. 2003).

2.6.4. Betume modificado com borracha recuperada de pneus em fim de vida

A borracha apresenta-se como um bom aditivo na redução de viscosidade do betume, originando uma mistura muito resistente à fadiga e ao fendilhamento.



Figura 2.12 - Amostra de borracha utilizada na modificação do betume (cortesia da Probigalp – foto do autor)

A presente sociedade deposita diariamente grandes quantidades de pneus nos aterros, pneus que atingiram o fim da sua vida útil e que constituem um resíduo perigoso para o ambiente e para a saúde pública. Com a crescente preocupação da sociedade na melhoria ambiental, na reciclagem e na reutilização dos materiais, têm-se procurado novos modos de inserir os pneus usados em novas aplicações, nomeadamente, na modificação de betumes.

Em 2 de Março de 2007, surgiu um Despacho Conjunto (n.º 4015/2007) do Ministério do Ambiente e do Ministério das Obras Públicas e das Comunicações relativo à utilização de borracha de pneus na modificação de betumes.

Em Fevereiro de 2009, a Estradas de Portugal, editou uma nova versão do Caderno de Encargos Tipo onde apresenta especificações para o betume com borracha de pneus, bem como para as misturas susceptíveis de se produzirem com estes ligantes. No entanto, ainda se encontra pendente a edição de uma Norma Portuguesa de especificação dos betumes com borracha de pneu (Nunes, Lucas et al. 2009).

A incorporação da borracha de pneus (figura 2.13) no betume pode ocorrer segundo a via húmida (*wet-process*) e a via seca (*dry-process*).

A adição directa de borracha de pneus no betume corresponde ao método da via húmida, processo que permite obter uma mistura homogénea. Este método subdivide-se em dois processos de produção, o “*Terminal Blend*” que corresponde à incorporação de baixa percentagem de borracha (inferior a 8%) e média percentagem de borracha (8-15%) e é produzida industrialmente, e o “*Continuous Blend*” que corresponde aos betumes modificados com alta percentagem de borracha (16-22%) e é produzido junto à central de fabrico de misturas betuminosas. O processo da via seca corresponde à introdução directa da borracha no misturador conjuntamente com os agregados aquecidos aos quais se adiciona posteriormente o betume. Neste caso a dispersão do betume pode não ocorrer da forma homogénea, embora seja um processo barato (Dias e Picado Santos 2009).

Capítulo 3

MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS

3. MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS

O aquecimento global, a necessidade de redução da emissão de gases para a atmosfera e os elevados custos energéticos, têm levado à investigação de novas técnicas para reduzir a produção e aplicação das misturas betuminosas. Destas preocupações, surgiram as misturas betuminosas temperadas (MBT).

As tradicionais misturas betuminosas a quente (MBQ) são produzidas a temperaturas entre 150 e 180°C, dependendo do betume. Para este intervalo de temperaturas são garantidos: a secagem dos agregados; o adequado envolvimento do ligante aos agregados; e a trabalhabilidade adequada, para a mistura e compactação das mesmas.

A utilização de aditivos e a aplicação de novos métodos de fabrico tem vindo a demonstrar ser possível uma redução de até 40% da temperatura de produção, aplicação e compactação das misturas betuminosas, em comparação com as MBQ (Ferreira, Oliveira et al. 2009).

A figura 3.1 classifica os diferentes tipos de misturas betuminosas consoante a temperatura de mistura e a energia necessária para o aquecimento dos materiais (EAPA 2010).

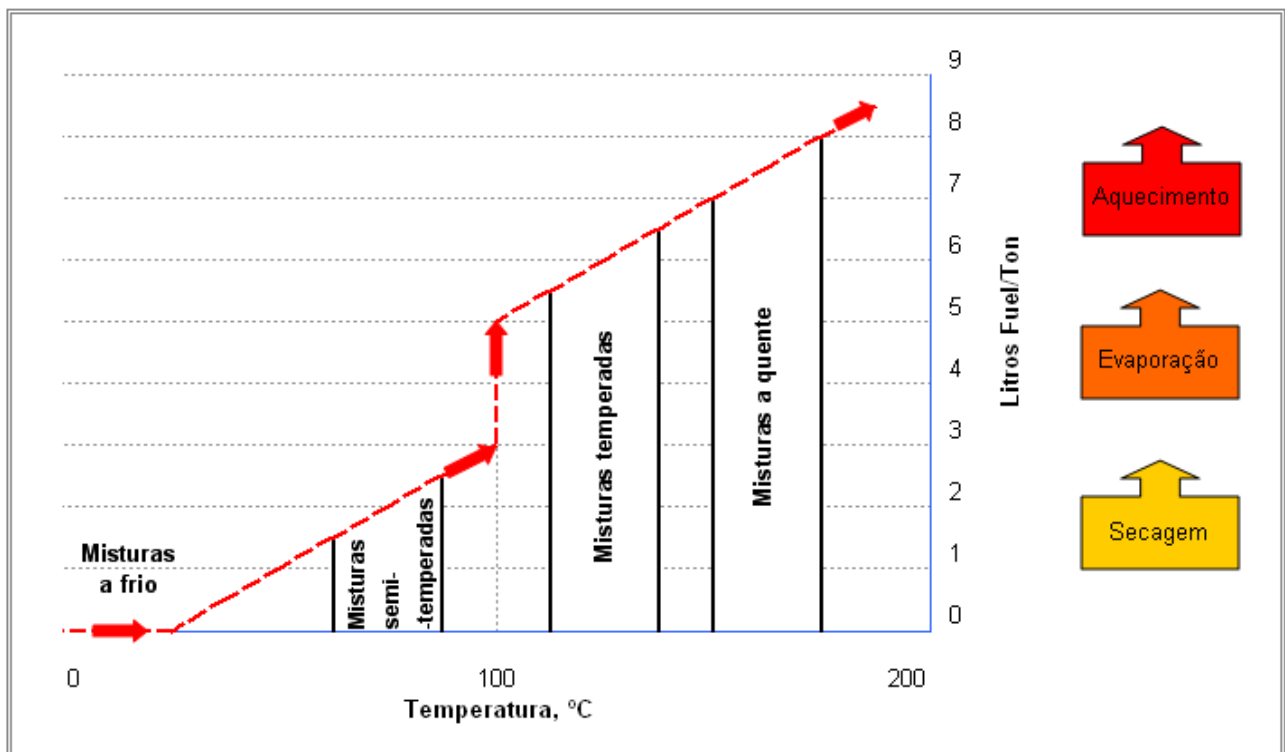


Figura 3.1 - Classificação das misturas betuminosas em função da temperatura de produção (EAPA 2010)

A redução da temperatura traduz-se em inúmeras vantagens: diminuição do consumo energético e, por consequência, do custo de produção; diminuição da emissão de gases nocivos ao ambiente (figura 3.2); redução da exposição dos trabalhadores aos gases; melhoria das condições e das técnicas de aplicação (LVBA 2010).

As MBT tendem a apresentar uma melhoria na compactação, o que se traduz na redução da permeabilidade e do endurecimento do ligante devido ao envelhecimento, melhorando o desempenho a nível da resistência à fissuração e susceptibilidade à humidade (Kristjansdottir 2006).



Figura 3.2 - Diferença nas emissões de fumos e gases observados na central durante a descarga de uma mistura betuminosa a quente e uma temperada (Ferreira, Oliveira et al. 2009)

3.1. Técnicas de produção de misturas betuminosas temperadas

As MBT utilizam várias técnicas de redução da viscosidade efectiva do ligante, permitindo o revestimento integral dos agregados durante a fase de mistura, e posteriormente a aplicação e compactação a baixas temperaturas. Como garantem temperaturas de mistura superiores ao ponto de ebulição da água, a presença das moléculas de água na mistura final é muito reduzida.

De acordo com a *European Asphalt Pavement Association* (EAPA), as técnicas mais comuns são (EAPA 2010):

- Técnicas de espuma
- Aditivos químicos
- Aditivos orgânicos

Têm surgido inúmeras técnicas e aditivos para a produção das misturas temperadas (tabela 3.1). No entanto, nos seguintes pontos apenas serão abordados os processos e aditivos que mais se destacam no mercado.

Tabela 3.1 - Alguns processos e aditivos utilizados na produção MBT (Adaptado de Vaitkus, Čygas et al. 2009)

Aditivos/Processos	Produtor	Percentagem utilizada	Temperaturas de produção (intervalo de redução da temperatura) °C
Técnicas de espuma com utilização directa de água			
Wam-foam®	Shell (Inglaterra) e Kolo-Veidekke (Noruega)	2-5% de água por massa de betume	100-120
Double-Barrel® Green	Astec Industrines (EUA)	Aproximadamente 2% de água pela massa do betume	116-135
LEA® - Low Energy Asphalt	Fairco e a Eiffage Travaux Publics (França)	3% de água com areia fina	<100
LEA-BAM®	Royal Bam Group (Holanda)	O betume é aditivado (0,1% pela massa do betume)	95
Ultrafoam GX™	Gencor (EUA)	-	110-115
LT-Asfalt®	Nynas (Holanda)	Aditivo hidrofílico (0,5 – 1,0% da massa do betume)	90
Terex® WMA foam	Terex (EUA)	Aproximadamente 2% de água pela massa do betume	90-130
Aquablack®	Maxam™ (EUA)	-	100-120
Minerais			
Zeolites naturais	Várias	-	-
Advera®	PQ Corporation (EUA)	0,25% por massa de mistura	120
Aspha-min®	Eurovia GmbH (Alemanha)	0,3% por massa da mistura	(20-30)
Aditivos orgânicos			
Sasobit®	Sasol Wax (África do Sul)	2,5-3,0% da massa de betume	(20-30)
Asphaltan B	Romonta GmbH (Alemanha)	2,0-4,0% da massa de betume	(20-30)
Licomont Bs 100	Clariant (Suíça)	3,0% da massa de betume	(20-30)
CCBit113 AD	Dr. Hutschenreuther (Alemanha)	2,5-3,5% da massa de betume	(35)
Aditivos químicos			
Cecabase® RT	Ceca (França)	0,3-0,5% da massa de betume	(30)
Rediset™	Akzo Nobel (Holanda)	1-2% da massa de betume	(30)
Iterlow T	Iterchimica (Itália)	0,3-0,5% da massa de betume	120
Evotherm™	MeadWestvaco (EUA)	0,5% da massa de betume numa emulsão com 70% de betume	115
Revix ou Evotherm 3G	MeadWestvaco (EUA)	-	(30-40)

3.1.1 Técnicas de espuma

As técnicas de espuma podem utilizar zeolites (naturais ou sintéticos) ou água para a produção da espuma. Existem diversos processos/equipamentos com recurso à água para a produção do betume espuma, destacando-se os processos de duas fases (liquida e gasosa) são exemplos comerciais o WAM-FOAM® (*Warm asphalt mix foam*), Double-Barrel® Green, LEA® (*Low Energy Asphalt*), LEAB®, LT-Asfalt® e a Ultrafoam GX™.

Os zeolites são constituídos por cadeias de silicatos com grandes espaços vazios na sua estrutura, que permitem a presença de grandes catiões como o sódio, o cálcio e de moléculas de água. Este tipo de material caracteriza-se como sendo um material com grande capacidade de absorção e perda de água sem que ocorra alteração da sua estrutura cristalina (Hurley and Prowell 2006).

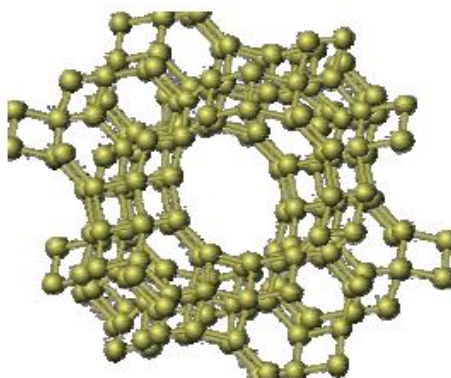


Figura 3.3 - Estrutura molecular de uma zeolite (Silveira, Filho et al. 2007)

Os minerais são inseridos durante a fase de mistura do betume com o agregado. Apresentando-se sob a forma de pó, contêm cerca de 20% de água em relação ao seu peso nos espaços vazios da sua estrutura. Quando sujeitos a temperaturas acima de 100°C ocorre a expulsão das moléculas de água, criando um efeito de micro-espuma, o que provoca a expansão do volume do ligante, reduzindo a viscosidade e o aumento da trabalhabilidade da mistura a temperaturas mais baixas.

Com adições na ordem de 0,3% de aditivo pode obter-se uma diminuição de 30°C da temperatura, durante a fase de produção e de aplicação (Hurley and Prowell 2006).

Este tipo de processo mostra-se eficaz para os betumes convencionais, betumes modificados, entre outros, podendo ainda ser utilizado na reciclagem de pavimentos. Os ganhos energéticos rondam os 30% e uma redução na emissão de gases para a atmosfera na ordem dos 60%.

No processo de mistura de uma fase, o betume espuma é produzido pela combinação do betume quente com água fria. Quando a água entra em contacto com o betume, ela transforma-se em minúsculas gotículas de vapor, aprisionando no seu interior o betume. Esta transformação leva a um aumento do volume do betume e à redução da viscosidade, permitindo obter uma redução entre 20 a 30°C da temperatura durante a fase de mistura com o agregado. Após o arrefecimento, o betume volta à sua viscosidade normal, sem alteração das suas propriedades (EAPA 2010).

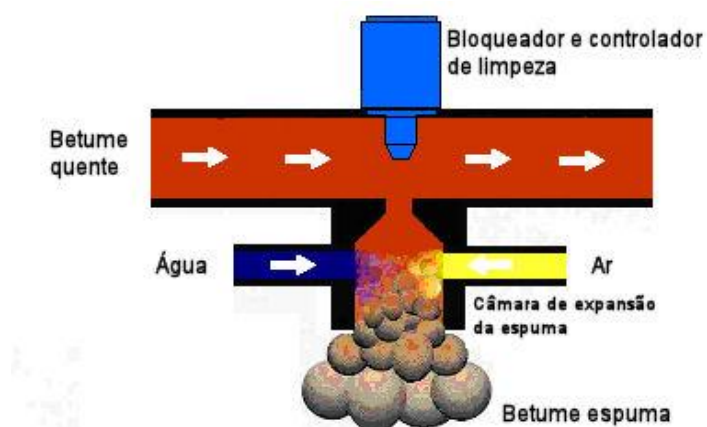


Figura 3.4 - Esquema de produção do betume espuma (Wirtgen 2004)

O tipo e o tamanho do agregado são importantes para a obtenção de uma mistura betuminosa homogénea. Misturas com baixo teor de finos não são indicadas para aplicação de betume espuma, porque o betume não se dispersa adequadamente. A espuma de betume não reveste completamente a superfície dos agregados, tem no entanto uma afinidade pelas partículas finas, inferiores a 75 micra, formando um mástique que efectivamente aglutina o material do pavimento (Seixas, P. 2008). O coeficiente de expansão deve ser suficientemente elevado de forma a ser possível cobrir o máximo de agregado.

O tempo médio de vida do betume espuma é um parâmetro importante, se for muito pequeno, o betume é revertido a um líquido de elevada viscosidade, com o risco de se encontrarem pedaços com elevadas concentrações de betume.

A produção das MBT com espuma com duas fases (WAM-FOAM[®]) utiliza o mesmo conceito anterior, no entanto, numa primeira fase um betume mole é misturado com o agregado a uma temperatura de 100° C, obtendo-se um pré-revestimento do agregado. Numa segunda fase é inserido o betume duro quente combinado com água fria, a espuma resultante permite um maior envolvimento com o agregado a baixas temperaturas. O processo permite obter temperaturas entre 100 e 120° C na fase de mistura e temperaturas entre 80 e 110° C na fase de compactação.

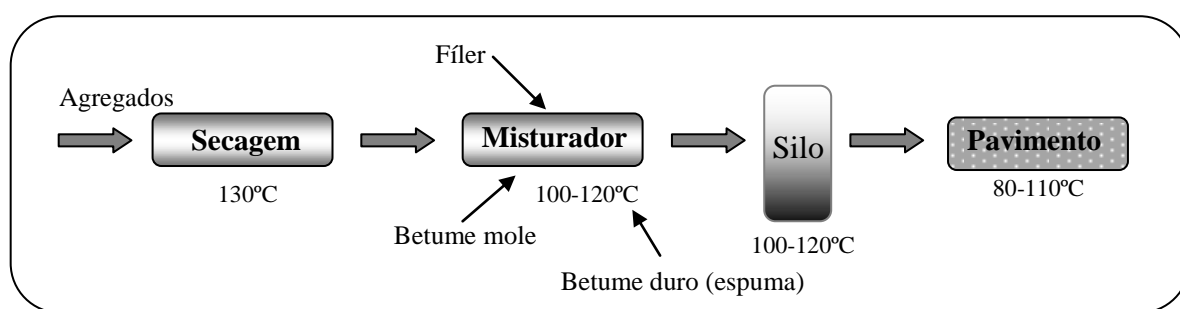


Figura 3.5 - Esquema do processo utilizado na produção betume-espuma pelo método da Wam-foam[®]

A utilização dos betumes adequados assim como a garantia do envolvimento do betume com o agregado na primeira fase são factores importantes para que se obtenha uma boa MBT (Gandhi 2008). Durante a produção das misturas betuminosas pelo processo de duas fases obtém-se uma significativa redução dos gastos energéticos e da emissão de gases para a atmosfera.

O Double-Barrel[®] Green (figura 3.6) consiste num dispositivo de duplo tambor cilíndrico utilizado para a produção de bolhas microscópicas através da combinação de uma pequena quantidade de água com o betume. Com este dispositivo são relatadas reduções de consumo de combustível de 14% na secagem dos agregados e um aumento de 14% na produção (Astecinc 2010).



Figura 3.6 – Duplo tambor cilíndrico (Astecinc 2010)

O *Low Energy Asphalt* (LEA) engloba 3 variantes de produção de misturas betuminosas com betume espuma. O seu desenvolvimento teve início no ano de 2000 como meio alternativo para a produção de misturas betuminosas, oferecendo uma solução de baixo custo e com um menor impacto ambiental face às MBQ. Tem sido utilizado desde 2003 pelos países da União Europeia e nos Estados Unidos desde 2007.

A LEA utiliza o aquecimento moderado dos agregados de maiores dimensões e a introdução dos restantes agregados húmidos à temperatura ambiente, de modo à obtenção do efeito do betume espuma durante a fase de mistura dos agregados com o betume.

A primeira variante dos processos LEA encontra-se ilustrada na figura 3.7.

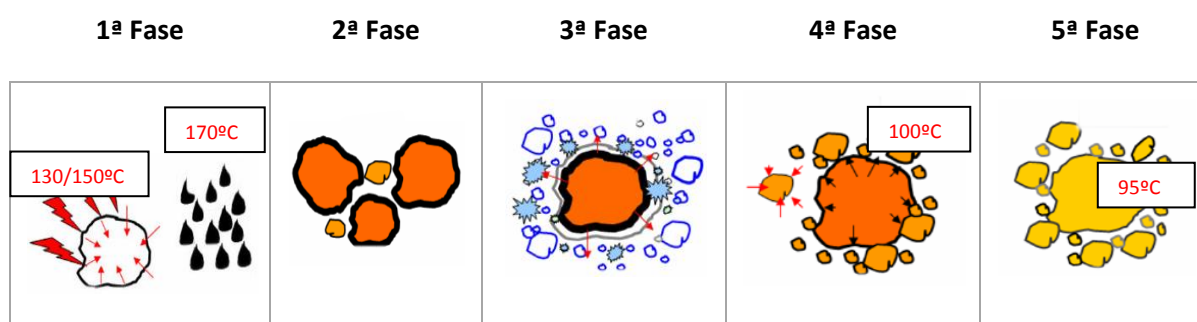


Figura 3.7 - Esquema da primeira variante utilizada na produção de misturas com espuma (adaptado D'Angelo et al. 2008)

Numa primeira fase são aquecidos os agregados de maior granulometria a uma temperatura entre 130-150°C e o betume a 170°C. Na segunda fase é efectuada a mistura dos agregados com o betume. Após verificado o envolvimento do betume nos agregados é efectuada a

terceira fase, na qual se inserem os agregados de menor granulometria (finos) à temperatura ambiente e saturados. A diferença entre as temperaturas dos agregados e a água presente nos finos vai proporcionar a formação de uma espuma, aumentando a trabalhabilidade da mistura a uma temperatura de aproximadamente 100°C – quarta fase. Por fim, a quinta e última fase, na qual se estabelece o equilíbrio da temperatura de todo o sistema, a uma temperatura de cerca 95°C.

Existe uma segunda variante dos processos LEA que se exemplifica na figura 3.8.

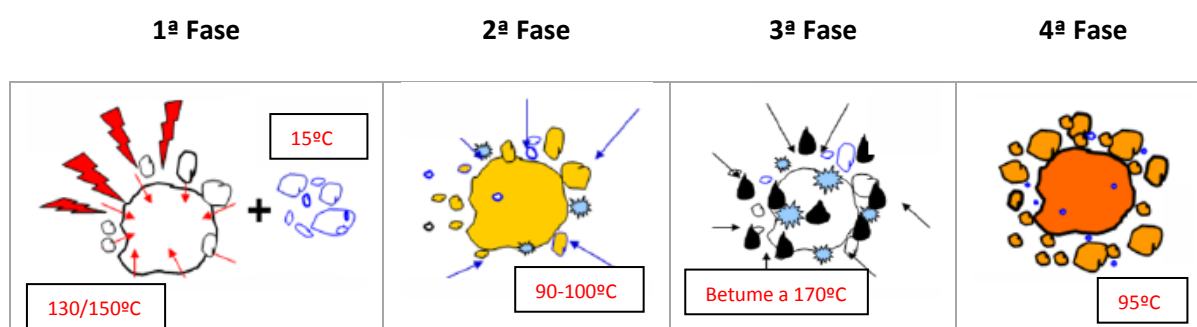


Figura 3.8 - Esquema da segunda variante utilizada na produção de misturas com espuma (adaptado D'Angelo et al. 2008)

Na primeira fase é efectuado o aquecimento dos agregados de maior granulometria a uma temperatura entre 130-150°C e dos finos a 15°C, saturados. Posteriormente, numa segunda fase é efectuada a mistura da granulometria, verificando-se uma redução da temperatura da mistura para valores entre 90-100°C, devido ao choque térmico. O betume é inserido numa terceira fase a uma temperatura de 170°C, o contacto do betume com as partículas de água presente nos finos, proporciona a expansão das gotículas de betume, favorecendo o envolvimento do betume para todas as fracções granulométricas. Numa quarta fase ocorre a estabilização do sistema a uma temperatura de aproximadamente 95°C.

Por fim, descreve-se a terceira variante dos processos LEA (figura 3.9).

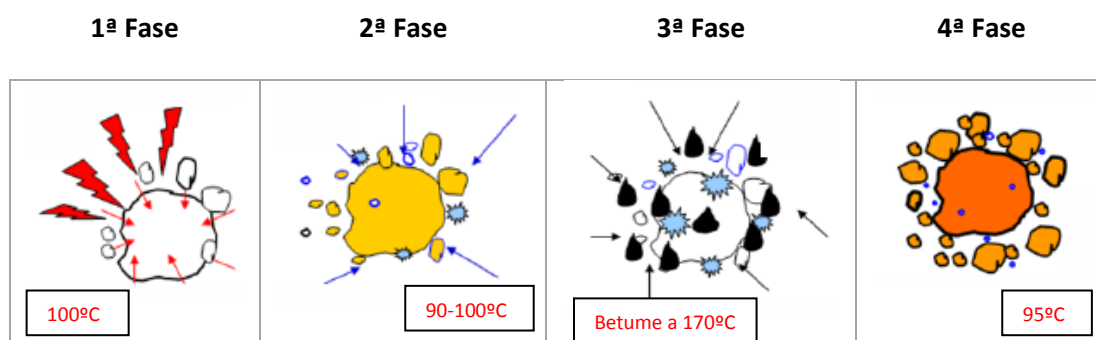


Figura 3.9 - Esquema da terceira variante utilizada na produção de misturas com espuma (adaptado D'Angelo et al. 2008)

Numa primeira fase, todos os agregados constituintes da curva granulométrica são aquecidos a uma temperatura de 100°C, mantendo um teor de água inferior 0,5%. Na segunda fase é adicionada água de modo a garantir um teor óptimo de água presente nos agregados, que ocorre a temperaturas entre 90-100°C. O betume é inserido numa terceira fase a uma temperatura de 170°C, o contacto do betume com as partículas de água vai proporcionar a expansão das gotículas de betume, favorecendo o envolvimento do betume em toda a mistura. Numa quarta fase ocorre a estabilização do sistema a uma temperatura de aproximadamente 95°C.

O grupo Holandês da *Royal BAM* desenvolveu o processo da LEAB[®], que permite a produção de misturas betuminosas a temperaturas inferiores ao ponto de evaporação da água (100°C), incidindo no fabrico de misturas no intervalo de temperaturas das misturas semi-temperadas.

Este processo surgiu do trabalho de Kim Jenkins (2000). No processo LEAB[®] não é acrescentada água extra na produção das misturas. A espuma é produzida em 6 nódulos (figura 3.11) e injectada directamente nos agregados. Na produção da espuma é adicionado um aditivo à base de aminas (0,1% em relação à base do betume) que aumenta a adesividade entre o betume e os agregados, assim como a estabilidade de armazenamento.

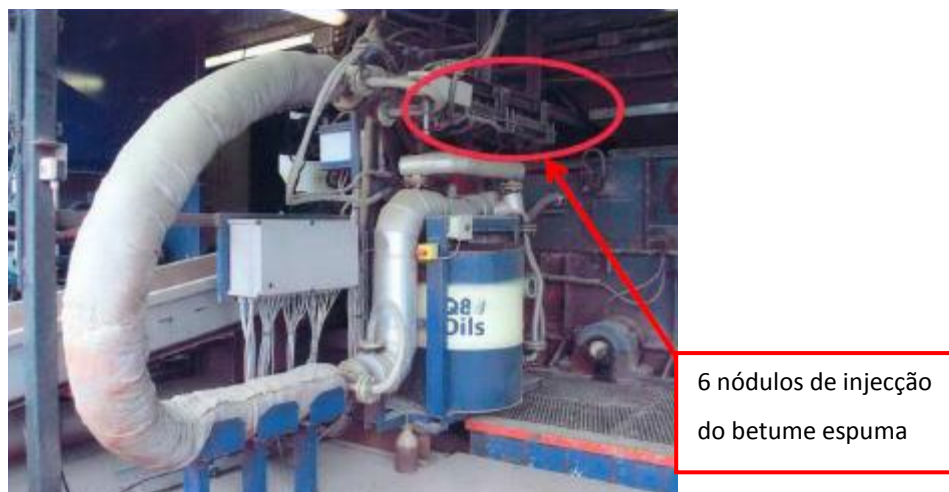


Figura 3.10 - Injecção do betume espuma numa central betuminosa (D'Angelo et al. 2008)

Utilizando este método pode obter-se uma redução do consumo energético de cerca 40% utilizando agregados virgens e de 30% para misturas com 50% de material reciclado (D'Angelo et al. 2008).

Os Holandeses da *Nynas* desenvolveram o LT Asphalt em resposta à redução do consumo energético e emissão de gases, contribuindo para um aumento da segurança e da sustentabilidade dos pavimentos rodoviários. O LT-Asphalt é uma solução para a produção de misturas a temperaturas próximas dos 100°C, utilizando um aditivo hidrofílico (0,5-1,0% da massa do betume) na produção do betume espuma. Permite que as misturas possuam até 7% de betume, enquanto as soluções idênticas presentes no mercado apenas podem usar até 3% de betume.

De acordo com o produtor, a uma temperatura de 60°C (figura 3.11) é possível efectuar-se a compactação da mistura, revelando uma trabalhabilidade idêntica à das misturas betuminosas a quente (Nynas 2010).



Figura 3.11 - Aplicação de uma mistura betuminosa produzida com LT-Asphalt (Nynas 2010)

A *Nynas* refere como principais vantagens na aplicação de uma mistura betuminosa produzida pelo método do LT-Asphalt, a redução nas emissões de dióxido de carbono (CO_2) e dos compostos orgânicos voláteis (VOC), aumento da janela temporal de transporte, compactação da mistura a temperaturas próximas dos 60°C e redução do consumo energético durante a produção em cerca de 40% (Nynas 2010).

Existem outros equipamentos que recorrem à água para a produção de espuma que têm emergido no mercado, no entanto estes equipamentos são bastante semelhantes aos atrás mencionados.

3.1.2. Aditivos químicos

Os aditivos químicos não alteram a viscosidade do betume. Actuam como surfactantes, na redução da tensão superficial do betume, regulando e reduzindo as forças de atrito entre o betume e o agregado para temperaturas de mistura entre 85 e 140°C , e na redução de 20 a 30°C nas temperaturas de compactação (EAPA 2010).

Os aditivos químicos podem ser inseridos directamente no betume ou na fase de mistura, sob a forma granular, líquida ou utilizando emulsões, melhorando as condições de compactação, adesão, revestimento e trabalhabilidade das misturas betuminosas a quente a temperaturas inferiores.

Alguns dos aditivos químicos mais utilizados nas MBT são: o Iterlow[®] T, o Rediset[™]WMX, o Cecabase RT[®], o Evotherm[™] e o Revix[™]/Evotherm[™] 3G (Vaitkus, Vorobjovas et al. 2009).

O Iterlow[®] T é um aditivo no estado líquido que quando adicionado ao betume permite produzir misturas betuminosas a baixas temperaturas. O produtor recomenda uma quantidade de 0,3 a 1,0% de aditivo de modo à obtenção de uma temperatura entre 90 e 120°C durante a produção da mistura betuminosa.

O aditivo apenas funciona como um agente tensioactivo, não modificando as propriedades químicas ou físicas do betume (temperatura de amolecimento, penetração e viscosidade) e é estável durante a fase de armazenamento (Iterchimica 2010).



Figura 3.12 - Aditivo inserido directamente na linha de alimentação do betume (Gandara 2010)

A sua aplicação é efectuada directamente na central, sem necessidade de grandes modificações da mesma (figura 3.12). Apresenta como vantagens o aumento da capacidade de produção da central, a redução entre 20 a 50% do consumo energético e diminuição de 40 a 70°C da temperatura de mistura, em comparação com misturas betuminosas a quente.

O Rediset[™] WMX (figura 3.13) é um produto desenvolvido pela *AKZO NOBEL*. Apresentando-se numa forma granular, a sua adição ao betume permite uma redução superior a 30°C na produção das misturas betuminosas, redução de consumo do

combustível em cerca de 20% e, por consequência, redução da emissão de gases durante as fases de mistura e compactação.



Figura 3.13 - Amostra de Rediset™ utilizado neste trabalho – foto do autor

O aditivo, além de contribuir para um menor impacto ambiental da pavimentação rodoviária, tende a prolongar o tempo de vida útil do pavimento. As suas características de anti-oxidante permitem uma maior resistência ao envelhecimento do betume, além de que a sua utilização não implica a modificação na composição das misturas nem, dos meios de produção e de aplicação das mesmas.

O produtor deste aditivo recomenda a aplicação de 10 a 20kg por tonelada de betume (AKZONOBEL 2010).

O Cecabase[®] é um produto na forma de gel (figura 3.14). Quando misturado com o betume permite uma redução da temperatura de mistura e de compactação em cerca de 50°C devido aos agentes tensoactivos.

A sua aplicação possibilita uma redução do consumo energético entre 20-50%, dependendo do processo, e uma redução da emissão de gases em cerca de 90%. A incorporação deste aditivo, em quantidades entre 0,2 e 0,4% da massa do betume, permite a redução da temperatura de aplicação para cerca de 120°C e, ao mesmo tempo, a manutenção das propriedades de um pavimento clássico produzido a 160-180°C (CECA 2010).



Figura 3.14 - Amostra do Cecabase® utilizado neste trabalho – foto do autor

O Evotherm™ apresenta-se como uma solução na redução das emissões de carbono durante a pavimentação rodoviária. A percentagem típica de aditivo utilizado é de 0,5% e é inserido directamente numa emulsão betuminosa de elevado teor, com aproximadamente 70% (Hurley e Prowell 2006). A emulsão é misturada com os agregados quentes, permitindo realizar a mistura a uma temperatura entre 85 e 115°C (Prowell 2007). Quando ocorre o processo da mistura a água liberta-se sob a forma de vapor no contacto com os agregados aquecidos, proporcionando um bom revestimento dos agregados.

Durante a produção da mistura betuminosa, a emulsão com o Evotherm™ é inserida directamente na central, em substituição do betume base (Hurley e Prowell 2006). Apresenta como vantagens a diminuição de gases, o aumento da janela temporal entre a fase de mistura e de compactação, o aumento do tempo de vida útil do pavimento, a redução de cerca 80% do dióxido de enxofre, proporciona um aumento de segurança para com os trabalhadores durante a fase de compactação, uma diminuição do tempo de compactação, assim com do tempo de cura do pavimento.

O Evotherm™ já foi aplicado, com comprovado desempenho, em mais de 25 estados nos Estados Unidos da América, França, Espanha, Canadá, México, África do Sul e China (Asphalt Institute 2009).

O Revix™ é um produto desenvolvido pela *Mathy Technology and Engineering Services, Inc. and Paragon Technical Services*, no entanto encontra-se licenciado e comercializado pela *MeadWestvaco* sob o nome Evotherm™ 3G.

Este aditivo não necessita do recurso a princípios de produção de espuma ou à redução da

viscosidade para a produção de misturas betuminosas a temperatura inferiores às convencionais. Utiliza uma tecnologia que combina agentes tensioactivos, ceras, polímeros, ácidos e outros materiais, de forma a verificar-se a redução do atrito interno entre os agregados e o betume, durante a fase de mistura e compactação (Baumgardner 2008).

3.1.3. Aditivos orgânicos

Os aditivos orgânicos como as ceras, as amidas gordas ou os compostos de éster de baixo peso molecular, podem ser adicionados à mistura ou ao betume. A utilização deste tipo de aditivos permite uma redução da viscosidade para temperaturas superiores a 90°C. O tipo de aditivo deve ser seleccionado tendo em conta as temperaturas de serviço a que o pavimento está sujeito, garantindo-se que o ponto de fusão do aditivo seja sempre superior à temperatura de serviço (EAPA 2010).

Em estudos efectuados com aditivos orgânicos, obtiveram-se reduções de temperaturas de produção e compactação entre 18 a 54°C, sendo recomendada uma taxa de aplicação de aproximadamente 1% do betume, mas nunca superior a 3% (Hurley and Prowell 2006).

A utilização destes aditivos permite uma redução do envelhecimento do betume, diminui a temperatura de compactação, melhora a compactação, apresenta um bom desempenho em termos de susceptibilidade à humidade e aumenta a rigidez da mistura. (Kristjansdottir 2006)

Alguns dos aditivos orgânicos utilizados nas misturas temperadas são: Sasobit[®], Asphaltan[®] B, Licomont BS 100 (Vaitkus, Vorobjovas et al. 2009) e o ccbt113.

O Sasobit[®] é constituído por uma fina e longa cadeia cristalina de hidrocarbonetos alifáticos. Desenvolvido pela *Sasol Wax*, inicialmente o Sasobit[®] era produzido a partir do carvão, mas em 2003 começou a produzir-se a partir do gás natural.

O aditivo é comercializado sob a forma de grãos com 5mm de diâmetro, grãos de 1mm ou em flocos com cerca de 3mm, como demonstra a figura 3.15.

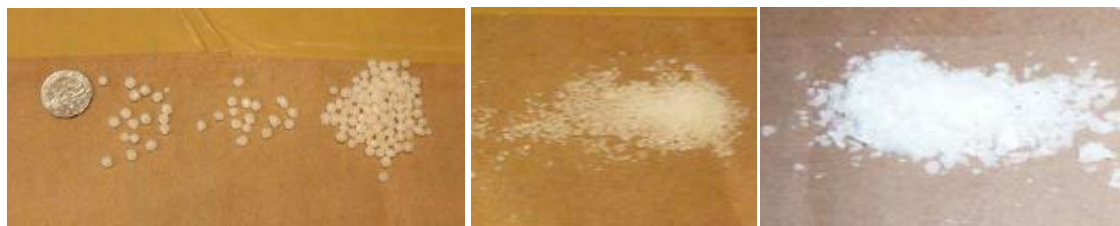


Figura 3.15 - Diferentes formas de Sasobit® (Shaw 2008)

A sua estrutura química é idêntica à das ceras de parafina, que são encontradas no petróleo bruto, excepto conterem um maior peso molecular. Com um ponto de fusão de 100°C, o Sasobit® diminui a viscosidade da mistura. Enquanto se encontra no estado líquido, aumenta a trabalhabilidade da mistura betuminosa. No entanto, para temperaturas inferiores ao seu ponto de fusão este rapidamente se cristaliza. (Sasolwax 2010)

O produtor recomenda uma dosagem de 1,5 a 1,7% de aditivo em relação à massa do betume. Pode ser aplicado no betume ou durante a fase de mistura, injectando-o directamente para dentro do misturador (figura 3.16). Durante o primeiro minuto de mistura é aconselhada uma temperatura 10°C abaixo da convencional de uma MBQ, reduzindo-se a mesma até se verificar que a central não se encontra a misturar em esforço. Em trabalhos já efectuados, obtiveram-se temperaturas entre 110 e 120°C durante a fase de mistura (Shaw 2008).



Figura 3.16 - Injecção directa do Sasobit® no misturador (Shaw 2008)

O Asphaltan[®] B é um produto resultante da combinação da cera de Montana com moléculas de hidrocarbonetos de elevado peso molecular. A cera de Montana existia nas plantas do Período Terciário, protegendo-as das condições extremas infligidas pelo clima. A cera não se decompõe e devido à sua alta estabilidade e insolubilidade em água, tem sobrevivido até aos dias de hoje em determinados tipos de lenhite ou depósitos de carvão. Estes depósitos encontram-se localizados na Alemanha, Europa Oriental e nos Estados Unidos (Government Engineering 2007). O Asphaltan[®] B apresenta um ponto de fusão de aproximadamente 100°C e é um melhorador da viscosidade do betume, o que permite um manuseamento do mesmo a uma temperatura de mistura inferior à convencional. Pode ser aplicado directamente no betume ou durante a fase de mistura. Encontra-se sob a forma granular e é recomendada uma adição do produto entre 2 a 4% em relação à massa do betume.

O Licomont[®] BS 100 é uma amida gorda, desenvolvida pela *Clariant, Basel*, na Suíça, apresentando-se como um melhorador das propriedades físicas do betume e da mistura. A adição do Licomont[®] BS 100 permite uma redução da viscosidade, diminuído a temperatura da mistura, redução da penetração e um aumento da temperatura de amolecimento do betume. Contribui para uma maior resistência ao tráfego pesado, reduzindo as deformações impostas no pavimento e aumentando o tempo de vida útil do mesmo.

O produtor não apresenta uma percentagem ideal de aditivo. No entanto, verificou-se que após o ensaio de resistência à deformação (*Wheel Tracking*), uma mistura com 3,0% de aditivo num betume com gama de penetração 70/100, obteve uma menor deformação ao fim de 20.000 ciclos, em comparação com uma mistura com o betume base ao fim de 12.000 ciclos, como demonstrado na figura 3.17.

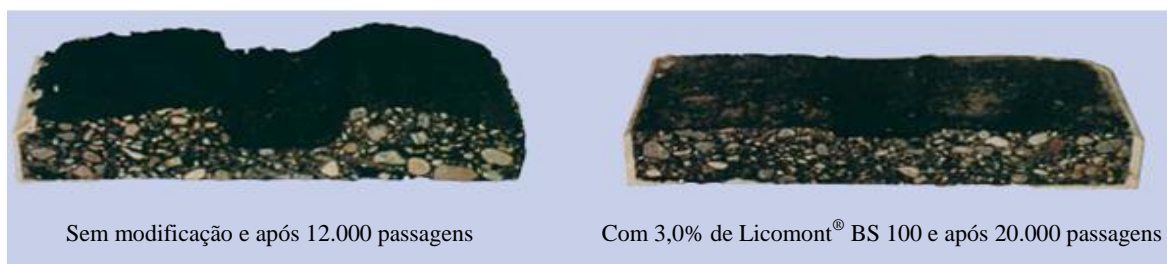


Figura 3.17- Comparação da resistência à deformação com Licomont® BS 100 (Clariant 2007)

3.2. Vantagens e desvantagens das misturas betuminosas temperadas

A utilização das MBT apresenta vantagens e desvantagens a nível económico e ambiental, durante as fases de mistura, compactação e nas propriedades das misturas. Apresentam-se alguma das possíveis vantagens e desvantagens das misturas betuminosas temperadas (MBT).

Vantagens: Diminuição dos custos energéticos nas fases de mistura e aplicação; Redução da exposição dos trabalhadores a gases nocivos; Diminuição dos gases emitidos (SO_2 , CO_2 , CO e óxidos de azoto) para a atmosfera durante as fases de mistura e compactação; Aumento da trabalhabilidade a baixa temperaturas; Diminui a temperatura de compactação e melhora a compactação; Redução da temperatura de mistura; Aumento da rigidez da mistura após arrefecimento; Apresenta um bom desempenho em termos de susceptibilidade à humidade; Apresentam um desempenho igual ou superior às misturas convencionais, nomeadamente na resistência à fadiga e à deformação permanente; Redução do envelhecimento do betume.

Desvantagens: As baixas temperaturas podem implicar uma secagem incompleta do agregado; Pode verificar-se uma reduzida resistência à tracção; Redução excessiva do volume de vazios; Falta de regulamentação e de incentivos à sua utilização; Custos dos aditivos e dos equipamentos de mistura; Poucos casos de estudos e de aplicação, com vista avaliar o desempenho das misturas a longo prazo; Os produtores encontram-se reticentes perante esta tecnologia.

3.3. Legislação das misturas betuminosas temperadas

As MBT já foram utilizadas em diversos países (figura 3.18), no entanto ainda não existe legislação específica que contemple a produção e aplicação de misturas betuminosas temperadas.



Figura 3.18 - Países onde foram já utilizadas MBT (Beuving 2008)

A França, a Inglaterra, a Irlanda e a Holanda são os únicos países que têm demonstrado interesse na regulamentação e aplicação das misturas betuminosas temperadas, com o intuito da redução da emissão de gases para a atmosfera (Beuving 2008).

As normas europeias para as misturas betuminosas, EN 13108-1/7, em vigor desde Março de 2006, apenas incluem as temperaturas máximas de produção das misturas utilizando betumes convencionais (Cen 2006).

Tabela 3.2 - Temperaturas limite de misturas (EN13108-1 2006)

Tipo de betume	Temperatura, °C
20/30	160 a 200
30/45	155 a 195
35/50, 40/60	150 a 190
50/70, 70/100	140 a 180
100/150, 160/220	130 a 170
250/330, 330/430	120 a 160

Quando se utilizam betumes modificados ou com aditivos, podem ser utilizadas diferentes temperaturas de produção. Estas devem ser documentadas e declaradas no certificado de marcação CE.

Capítulo 4

ESTUDO DA INTERACÇÃO ADITIVO-LIGANTE

4. ESTUDO DA INTERACÇÃO ADITIVO-LIGANTE

4.1. Introdução

No capítulo 3 referiram-se os principais equipamentos e aditivos usados para obter a diminuição das temperaturas de mistura e de compactação. No entanto, existe uma preocupação por parte dos produtores de betumes em, tanto quanto possível, tentar manter as características dos seus betumes e do modo de interacção com os aditivos, quer se tratem de betumes convencionais ou modificados.

Neste capítulo, o principal objectivo é a caracterização e análise do comportamento do betume para dois aditivos químicos, perante diferentes condições de mistura. A execução deste estudo baseou-se essencialmente nos ensaios de penetração, temperatura de amolecimento, RTFOT, recuperação elástica, viscosidade dinâmica e estabilidade de armazenamento, todos estes realizados em conformidade com as normas europeias em vigor.

Todo o estudo experimental foi efectuado no Laboratório da Probital S.A., utilizando-se os betumes disponibilizados pelo mesmo. Para a validação dos valores obtidos em alguns ensaios, os mesmos foram executados também pelo técnico responsável, Ulisses Teixeira.

Os betumes utilizados durante todo o estudo experimental, o procedimento efectuado durante a recolha e armazenamento das amostras, os procedimentos utilizados na execução dos ensaios aos betumes e os resultados obtidos são descritos no subcapítulo 4.2.

No subcapítulo 4.3 pormenorizam-se os aditivos e o protocolo experimental utilizado.

Nos subcapítulos 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos betumes modificados pelos dois aditivos em estudo. Compara-se os valores do ensaio de penetração, temperatura de amolecimento, envelhecimento (RTFOT), recuperação elástica e viscosidade dinâmica entre os betumes com e sem aditivos.

Por fim, no subcapítulo 4.8 faz-se uma análise global aos resultados obtidos, com ênfase para as maiores diferenças apresentadas.

4.2. Ensaios de caracterização dos betumes base e modificado com borracha

Foram utilizadas duas amostras de betumes base oriundas da refinaria da Galp (Sines) com gama de penetração 35/50 e 10/20, e um betume modificado com borracha com gama de penetração 35/50 produzido na Probigalp S.A., os quais designar-se-ão neste trabalho por B35/50, B10/20 e BBM35/50, respectivamente.

As amostras foram recolhidas para latas com cinco litros de capacidade, de modo a garantir-se o mesmo lote em todos os ensaios. De seguida etiquetaram-se e armazenaram-se em conformidade com a EN 58 (Cen 2004-d).

Na tabela 4.1 enunciam-se os valores de referência da qualidade dos três betumes utilizados.

Tabela 4.1 - Valores de referência da qualidade dos betumes utilizados.

Propriedades		Betumes		
		B 10/20	B 35/50	BBM 35/50
Penetração a 25°C-100g-5s (dmm) [EN 1426]		10 – 20	35 – 50	35 – 50
Temperatura de Amolecimento – Método do Anel e Bola (°C) [EN1427]		63–76°C	50-58°C	> 65°C
Viscosidade dinâmica [EN 13302]		-	-	> 310 mPa.s (175°C)
Recuperação elástica (25°C) [EN 13398]		-	-	> 150mm
Resistência ao envelhecimento (RTFOT) [EN 12607-1]	Variação da massa	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,8%
	Penetração a 25°C-100g-5s [EN 1426]	≥ 60%	≥ 53%	≥ 70%
	Temperatura de Amolecimento – Método do Anel e Bola [EN1427]	≤ 8°C	≤ 8°C	≥ -4°C ≤ 8°C
Estabilidade ao armazenamento [EN 13399]	Diferença de Penetração a 25°C-100g-5s (dmm) [EN 1426]	-	-	≤ 8 dmm
	Diferença da Temperatura de Amolecimento – Método do Anel e Bola (°C) [EN1427]	-	-	≤ 5°C

Legenda: dmm – Décima de milímetro; Qb– Quebrou antes de atingir os 100mm; N. efect. – Ensaio não efectuado; Inf. – Parte inferior do molde; Sup. – Parte superior do molde.

4.2.1. Procedimento adoptado na caracterização dos betumes

O procedimento de preparação das amostras foi efectuado de acordo com a EN 12594 (Cen 2007-c). As amostras foram aquecidas em estufa, utilizando-se uma temperatura de 150°C para o B35/50 e a temperatura de 175°C para o B10/20 e BBM35/50. Verificada a completa fusão dos mesmos, no limite máximo de 4 horas, efectuou-se a homogeneização das amostras com uma vareta, agitando-se manualmente durante 2 a 3 minutos. Por fim o betume, na sua forma líquida, foi colocado nos respectivos moldes de ensaio.

Os ensaios efectuados na caracterização dos betumes foram os enunciados na tabela 4.1 e foram executados de acordo com as respectivas normas europeias.

- **Determinação da penetração - EN 1426**

Consiste na medição da penetração de uma agulha normalizada numa amostra em condições pré-definidas. Este ensaio foi realizado com recurso a um penetrómetro semi-automático (figura 4.1).

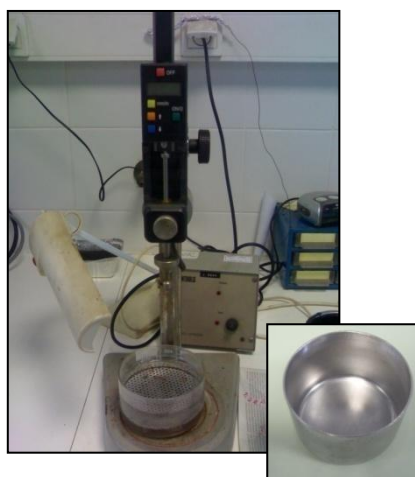


Figura 4.1 - Penetrómetro semi-automático e cápsula de ensaio (Laboratório da Probigalp – foto do autor)

A cápsula de penetração foi totalmente preenchida e de seguida tapada com um vidro relógio, de forma a facilitar a libertação das bolhas de ar e evitar a acumulação de

partículas de pó. Após um arrefecimento de 90min, a cápsula foi colocada em banho-maria durante mais 90min e posteriormente determinada a penetração do ligante, mantendo a cápsula dentro de um copo de modo a garantir a temperatura de ensaio (Cen 2007-a).

- **Determinação da temperatura de amolecimento - EN 142**

Neste procedimento, os anéis (figura 4.2) foram aquecidos a uma temperatura de aproximadamente 90°C acima da temperatura de amolecimento estimada para o betume. Posteriormente foram colocados sobre uma placa metálica com uma camada fina de glicerina, impedindo a adesão do betume à placa, sendo depois colocado o betume dentro dos anéis. Trinta minutos depois os anéis foram alisados com uma espátula aquecida e ficaram mais 30 minutos arrefecer.

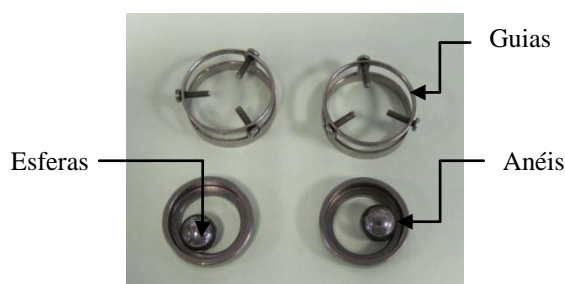


Figura 4.2 - Guias, anéis e esferas utilizados (Laboratório da Probitalp – foto do autor)

Por fim, colocaram-se os anéis no suporte e inseriram-se dentro do copo com o líquido, água (a 5°C) caso as temperaturas de amolecimento previstas fossem inferiores a 80°C e glicerina (a 25°C) para temperaturas superiores. Os copos com água e o suporte foram colocados durante 30 minutos dentro de uma câmara de refrigeração a 5°C e aqueles com glicerina deixaram-se em banho-maria a uma temperatura de 25°C.

A execução do ensaio terminou com a aplicação do copo com suporte no equipamento mostrado na figura 4.3 e de uma esfera sobre cada anel. O equipamento aumenta a temperatura em 5°C/min de forma constante, terminando o procedimento quando a esfera

atinge o patamar inferior do suporte. O valor da temperatura de amolecimento corresponde à média entre os dois anéis (Cen 2007-b).



Figura 4.3 - Ensaio de determinação da temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola (Laboratório da Probitalp – foto do autor)

- **Determinação da recuperação elástica - EN 13398**

Num resumo da norma, o ensaio consiste no alongamento do ligante a uma temperatura de 25°C à velocidade de 50mm/min. Quando são atingidos os 200mm de alongamento, o ‘fio’ do betume resultante é cortado ao meio num período máximo de 10 segundos. Trinta minutos depois, mede-se o comprimento entre as duas extremidades dos ‘fios’ cortados. A percentagem do comprimento recuperado em relação ao comprimento alongado corresponde à recuperação elástica.



Figura 4.4 – Ductilímetro e molde para efectuar o ensaio da recuperação elástica (Laboratório da Probitalp – foto do autor)

De forma a garantir a aplicação da norma, as peças de extremidade do molde da recuperação elástica (figura 4.4) foram previamente envolvidas em glicerina nas suas faces exteriores, com o cuidado da manutenção das superfícies interiores limpas. Pelo contrário, as peças do interior do molde foram completamente envolvidas em glicerina. O molde foi montado sobre uma superfície de vidro com um camada fina de glicerina e posteriormente enchido com o betume. Este último é vertido de uma forma lenta tendo o cuidado de se incidir nos cantos.

Depois de passados 30 minutos do enchimento do molde, este foi colocado em banho-maria a 35°C durante 30 minutos, posteriormente o molde foi retirado do banho e alisado com uma lâmina quente, voltando-se a colocar em banho-maria durante 90 minutos. Por fim o ensaio foi executado com o ductilímetro (figura 4.4), conferindo um alongamento nos moldes a uma velocidade de $50 \pm 2,5$ mm/minuto até atingir 200mm, cortando-se o betume ao meio e ao fim de 30 minutos foi medida a diferença entre as extremidades de corte (Cen 2004-c).

- **Determinação da resistência ao envelhecimento. Método RTFOT - EN 12607-1**

O ensaio RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) permite simular em laboratório o envelhecimento que o ligante sofre durante a fase de mistura e compactação.

Uma película de um ligante betuminoso é inserida dentro de um frasco e é sujeita a um movimento rotativo dentro de um forno (figura 4.5), aquecido a uma determinada temperatura e durante um período de tempo com um fornecimento constante de ar.

Os efeitos do calor e do ar são determinados com base na mudança de massa, na variação da penetração (EN 1426), temperatura de amolecimento (EN 1427) ou viscosidade dinâmica (EN 12596), antes e depois do ensaio.



Figura 4.5 - Equipamento utilizado no método RTFOT e o copo (Laboratório da Probigalp – foto do autor)

Os oito copos do *RTFOT* foram previamente numerados e aquecidos numa estufa a uma temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 1 hora e posteriormente colocados a arrefecer num exsiccador, durante 2 horas. Verificado o arrefecimento, os copos foram pesados e foi inserido em cada um $35 \pm 0,5$ gramas de betume sem que houvesse contacto do betume com a face exterior do copo.

A temperatura do ‘forno’ foi estabilizada a 163°C durante 1 hora, posteriormente os copos foram colocados dentro do forno. Ao fim de 1 hora retiraram-se os copos do forno, seis deles verteram-se para um gobelé, homogeneizou-se a mistura e encheu-se a cápsula de penetração e os anéis da temperatura de amolecimento. Os dois copos que sobraram colocaram-se no exsiccador durante 2 horas e foram posteriormente pesados, calculando-se a variação da massa (Cen 2007-d).

- **Determinação da viscosidade do betume usando viscosímetro rotativo - EN 13302**

O ensaio do viscosímetro rotativo (figura 4.6) permite determinar a viscosidade do ligante, essencial na determinação da temperatura a utilizar durante as fases de mistura e compactação.

Neste ensaio uma lâmina cilíndrica, o *spindle*, é submerso numa amostra de ligante a uma temperatura constante e determina-se o esforço de torção necessário para manter uma velocidade de rotação constante.



Figura 4.6 - Equipamento utilizado na determinação da viscosidade dinâmica (Laboratório da Probigalp – foto do autor)

O cartucho do viscosímetro foi preenchido com um volume de betume suficiente para que após a inserção do *splindle* ocorresse a completa cobertura do mesmo. Verificada a estabilização dos valores de viscosidade, anotaram-se três valores com um intervalo de 1 minuto (Cen 2003-b).

- **Determinação da estabilidade ao armazenamento - EN 13399**

Uma amostra homogênea de betume modificado foi mantida na vertical num tubo (figura 4.7) a 180°C durante 3 dias. Após o arrefecimento este foi cortado em três partes iguais. As duas extremidades (superior e inferior) foram analisadas para avaliação das possíveis diferenças nas suas características.

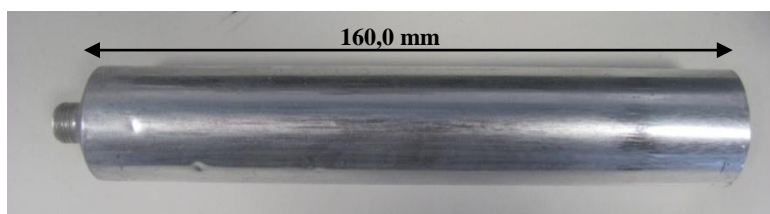


Figura 4.7 - Tubo usado na estabilidade de armazenamento (foto do autor)

No preenchimento do tubo, colocou-se a amostra liquidificada e homogénea até se atingir uma altura entre 100mm e 120mm, com o cuidado de se evitar a incorporação de bolhas de ar. O tubo foi bem fechado e bem cheio, de modo a evitar o contacto com o ar durante a elevada temperatura de armazenamento, apertando-se o tubo durante e no final do enchimento (Cen 2003-c).

4.2.2. Valores obtidos na caracterização dos ligantes

Com o intuito de verificar a qualidade dos ligantes, foi efectuada uma caracterização com todos os ensaios da tabela 4.2, respeitando-se os procedimentos e equipamentos impostos pelas normas europeias.

Tabela 4.2 - Valores obtidos na caracterização dos betumes.

Propriedades			Betumes		
			B 10/20	B 35/50	BBM 35/50
Penetração a 25°C-100g-5s (dmm) [EN 1426]			17,53	50,87	38,20
Temperatura de Amolecimento – Método do Anel e Bola (°C) [EN1427]			65,20	48,30	88,00
Recuperação elástica (25°C) [EN 13398]			Qb	29,00	185,50
Resistência ao envelhecimento (RTFOT) [EN 12607-1]	Variação da massa final com a inicial		-0,21%	-0,16%	-0,18%
	Penetração a 25°C-100g-5s [EN 1426]	Penetração obtida (dmm)	12,03	28,80	26,90
		Valor da penetração face à inicial (%)	68,63	56,61	70,42
	Temperatura de Amolecimento – Método do Anel e Bola [EN1427]	Temperatura obtida (°C)	71,10	60,20	92,00
		Diferença com a temperatura inicial (°C)	5,90	11,90	4,00

Legenda: dmm – Décima de milímetro; Qb– Quebrou antes de atingir os 100mm; Inf. – Parte inferior do molde; Sup. – Parte superior do molde.

Os valores obtidos nos ensaios utilizados para a caracterização dos betumes (tabela 4.2) revelaram que todos estes se inseriam dentro dos valores limites impostos pelos certificados de qualidade.

Para o ensaio da recuperação elástica verificou-se a rotura do betume duro 10/20 antes de este atingir os 100mm de extensão, o que não invalida a qualidade do betume.

4.3. Aditivos e protocolo experimental

Foram utilizados dois aditivos químicos, o Cecabase[®] e o Rediset[™] WMX (figura 4.8), na modificação dos betumes B10/20, B35/50 e BBM35/50.



Figura 4.8 - Amostras de Cecabase[®] e do Rediset[™] WMX (foto do autor)

O Cecabase[®] é um produto em forma de gel, desenvolvido pela CECA, que quando misturado com o betume permite uma redução da temperatura de mistura e de compactação em cerca de 50°C, devido aos agentes tensioactivos e sem qualquer efeito sobre o desempenho do material. A sua aplicação possibilita uma redução do consumo energético entre 20-50%, dependendo do processo e da emissão de gases em cerca de 90%. A incorporação deste aditivo (2 a 4 kg por tonelada de betume, ou seja 0,2 a 0,4%) permite uma redução da temperatura de aplicação para 120°C e ao mesmo tempo a manutenção das propriedades de um pavimento clássico produzido a 160-180°C (CECA 2010).

O Rediset[™] WMX é um produto de forma granular cuja adição ao betume permite uma redução superior a 30°C na produção das misturas betuminosas, redução do consumo de

combustível e na emissão de gases durante as fases de mistura e de compactação. O aditivo desenvolvido pela AKZO NOBEL além de contribuir para um menor impacto ambiental da pavimentação rodoviária, prolonga o tempo de vida útil do pavimento. As suas características de anti-oxidante permitem uma maior resistência ao envelhecimento do betume, além de que a sua utilização não implica a modificação das misturas finais, dos meios de produção e da aplicação das mesmas. O produtor recomenda a aplicação de 10 a 20kg por tonelada de betume (AKZO NOBEL 2010).

No sentido de pesquisar da existência ou não de alterações dos betumes com a adição dos diferentes aditivos, realizou-se o seguinte protocolo experimental:

- Pré-aquecimento do betume até uma temperatura de 150°C;
- Introdução do betume previamente aquecido num copo e colocado dentro de uma manta de aquecimento;
- Quando atingida uma temperatura de 175°C, introdução do aditivo;
- A uma temperatura constante, agitação do preparado, durante um intervalo de tempo definido.
- Os ensaios ao betume foram realizados de seguida de forma a evitar ao máximo os ciclos de aquecimento-arrefecimento.
- As amostras mantiveram-se no máximo durante 120 minutos na estufa e, a uma temperatura 100 °C acima do ponto de amolecimento esperado, sem nunca exceder os 200°C.

A figura 4.9 demonstra o método adoptado, o copo é inserido dentro da manta e envolvido com folhas de alumínio de modo a garantir uma menor dissipação do calor emitido pela manta. O controlo da temperatura do betume é efectuado com o auxílio de um termómetro mergulhado na mistura e com uma agitação constante segundo o eixo vertical.



Figura 4.9 - Método utilizado para a mistura dos betumes com os aditivos (Laboratório da Probigalp – foto do autor)

4.4. Resultados do B35/50 com Cecabase®

Na mistura do betume base 35/50 com o Cecabase®, testaram-se quatro percentagens de aditivo (0,10; 0,15; 0,20 e 0,30%), seguindo o procedimento experimental atrás descrito. Para uma percentagem de 0,10 e 0,15 de Cecabase® retiraram-se amostras aos 15, 30, 60, 90, 120 e 150 minutos, enquanto para as percentagens de 0,20 e 0,30 retiraram-se amostras aos 15, 30 e 60 minutos.

4.4.1. B35/50 com 0,10% de Cecabase®

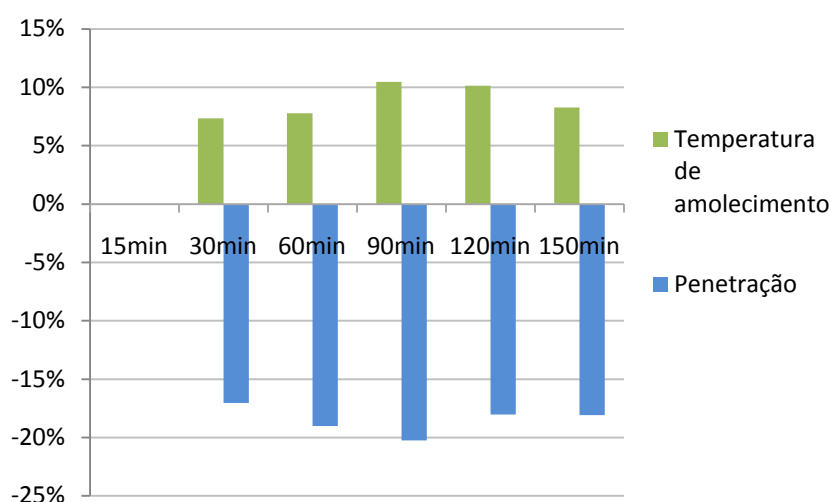
Na tabela 4.3 representam-se os resultados dos ensaios efectuados no B35/50 com 0,10% de Cecabase®. Aos 15 minutos apenas se procuraram diferenças na viscosidade. Nos restantes tempos foram também avaliadas a penetração e a temperatura de amolecimento. Além destas, na amostra dos 150 minutos realizaram-se os ensaios: RTFOT, recuperação elástica e estabilidade de armazenamento.

Tabela 4.3 - Resultados obtidos para B35/50 com 0,10% de Cecabase®

B35/50		B35/50 com 0,10% de Cecabase®										
		30min	Δ	60min	Δ	90min	Δ	120min	Δ	150min	Δ	
Pen (dmm)		50,9	42,2	-17%	41,2	-19%	40,6	-20%	41,7	-18%	41,7	-18%
AeB (°C)		48,3	51,9	7%	52,1	8%	53,4	10%	53,2	10%	52,3	8%
Rec.El. (mm)		29,0	-	-	-	-	-	-	-	-	29,5	2%
RTFOT	Δ massa (%)	-0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,04	-
	Pen (dmm)	28,8	-	-	-	-	-	-	-	-	27,5	-5%
	AeB (°C)	60,2	-	-	-	-	-	-	-	-	58,5	-3%

Legenda: Pen – Penetração; AeB – Anel e Bola; Rec. El. – Recuperação elástica; Δ massa – variação de massa; Δ – variação em relação ao betume base

As amostras retiradas apresentaram uma diminuição de 17 a 20% na penetração, face ao valor obtido no betume base, enquanto as temperaturas de amolecimento apresentaram um aumento de 7 a 10%, como é possível observar na figura 4.10. Relativamente à recuperação elástica o betume com aditivo apresenta um aumento de recuperação em 2%. Após o ensaio de envelhecimento (RTFOT) verificou-se um endurecimento do betume com aditivo, com uma diminuição da penetração e da temperatura de amolecimento.

**Figura 4.10 - Variação percentual da temperatura de amolecimento e penetração com 0,10% Cecabase®**

Foram retiradas amostras aos 45, 60, e 150 minutos de forma a analisar no microscópio electrónico a qualidade da homogeneização do B35/50 com o aditivo. Como podemos observar na figura 4.11, existe uma boa homogeneização desde a primeira amostra retirada.



Figura 4.11 - Imagens ao microscópio das amostras aos 45, 60 e 150 minutos, com uma ampliação de 10x

O ensaio da viscosidade dinâmica - EN 13302 (Cen 2003-b) foi executado com um viscosímetro rotativo, *Brookfield DVII-Pro*, de forma a determinar a viscosidade da mistura betume-base/aditivo nos diversos tempos de agitação e verificar se existe alguma variação de viscosidade com o betume base ou com o tempo de agitação.

Após a colocação da cápsula na manta e de inserido o *spindle*, foram garantidos 15 minutos para a estabilização da temperatura e de seguida foi activada a rotação do viscosímetro (20 rotações por minuto). Quando foi verificada a estabilização da viscosidade (entre 15 e 20 minutos) anotaram-se três valores com um intervalo de 60 segundos. Para além do valor de viscosidade registou-se a tensão de corte e o *spindle* utilizado.

As temperaturas de mistura e de compactação foram determinadas tendo em conta a intersecção da linha de tendência das viscosidades das amostras com as viscosidades expressas no caderno de encargos das Estradas de Portugal (CEEP). A temperatura de mistura foi determinada para valores em que se verifique uma viscosidade entre $170 \pm 20 \text{ cS}$ e para a temperatura de compactação, viscosidades entre os valores de $280 \pm 30 \text{ cS}$. (EP 2008).

A conversão da viscosidade dinâmica (*Centipoise, cP*) para viscosidade cinemática (*Centistokes, cS*) foi efectuada de acordo com a equação (4.1), considerando-se uma

densidade do betume de 1,03 nos betumes base e 1,04 no betume modificado com borracha.

$$\text{CentiStoke} = \frac{\text{CentiPoise}}{\text{Densidade}} \quad (4.1)$$

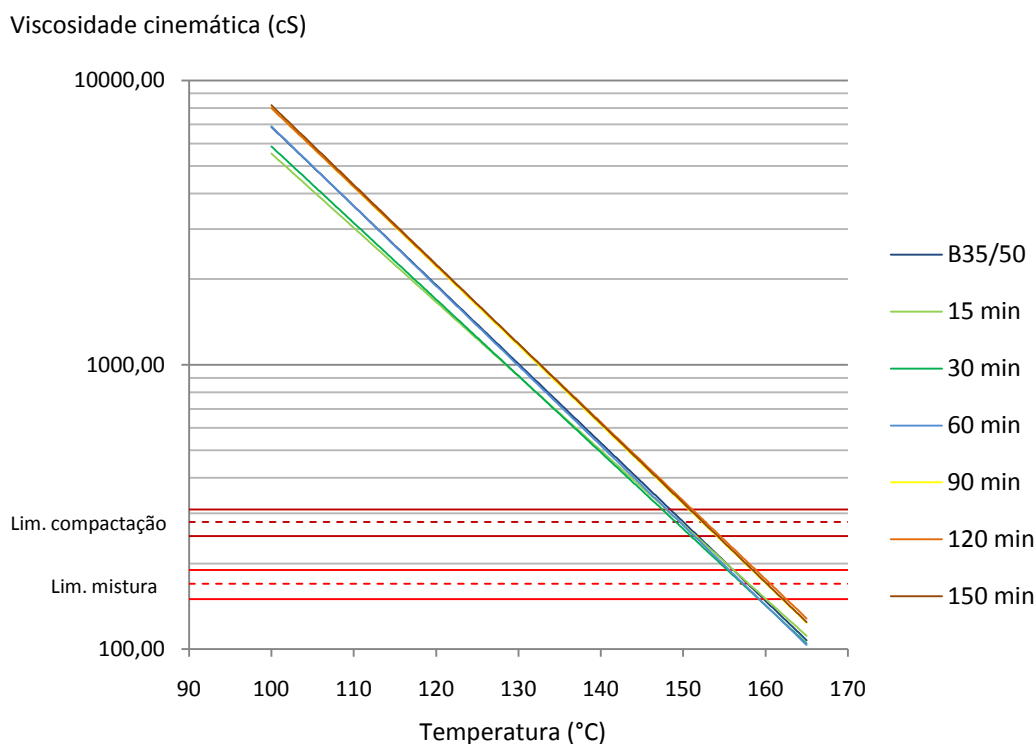


Figura 4.12 - Viscosidade das amostras B35/50 com 0,10% Cecabase®

A figura 4.12 representa as linhas de tendência de viscosidade. As primeiras amostras, 15 e 30 minutos, apresentam uma diminuição da viscosidade para uma temperatura de 100°C, para temperaturas superiores a linha da viscosidade tende a aproximar-se do betume base. A amostra dos 60 minutos encontra-se relativamente sobreposta à viscosidade do betume base. As amostras de 90, 120 e 150 minutos apresentam um aumento de viscosidade em toda a sua linha de tendência.

Denota-se pela linha de tendências de viscosidade do B35/50 uma temperatura de mistura de $\pm 158^{\circ}\text{C}$ e uma temperatura de compactação de $\pm 151^{\circ}\text{C}$. Para o B35/50 “modificado” obteve-se nas amostras de 90, 120 e 150 minutos uma temperatura de mistura de $\pm 161^{\circ}\text{C}$ e

uma temperatura de compactação de $\pm 153^{\circ}\text{C}$, as restantes coincidiram com as temperaturas do betume base.

4.4.2. B35/50 com 0,15% de Cecabase®

Para uma percentagem de 0,15 de Cecabase® e mantendo os procedimentos descritos para a percentagem de 0,10 obtiveram-se os resultados descritos na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados obtidos para B35/50 com 0,15% de Cecabase®

		B35/50	B35/50 com 0,15% de Cecabase®									
			30min	Δ	60min	Δ	90min	Δ	120min	Δ	150min	Δ
Pen (dmm)		50,9	40,2	-21%	38,2	-25%	38,2	-25%	38,5	-24%	38,5	-24%
AeB (°C)		48,3	53,9	12%	54,5	13%	54,5	13%	54,7	13%	55,1	14%
Rec.El. (mm)		29,0	-	-	-	-	-	-	-	-	30,0	5%
RTFOT	Δ massa (%)	-0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,13	-
	Pen (dmm)	28,8	-	-	-	-	-	-	-	-	24,1	-16%
	AeB (°C)	60,2	-	-	-	-	-	-	-	-	61,4	2%

Legenda: Pen – Penetração; AeB – Anel e Bola; Rec. El. – Recuperação elástica; Δ massa – variação de massa; Δ – variação em relação betume base

As amostras retiradas apresentaram uma diminuição de 21 a 25% na penetração face ao valor obtido no betume base, enquanto as temperaturas de amolecimento apresentaram um aumento de 12 a 14%, como é possível observar na figura 4.13. Relativamente à recuperação elástica, o betume com aditivo apresenta um aumento de recuperação em 5%. Após o ensaio de envelhecimento (RTFOT) verificou-se um endurecimento do betume com aditivo, com uma diminuição da penetração e um ligeiro aumento da temperatura de amolecimento.

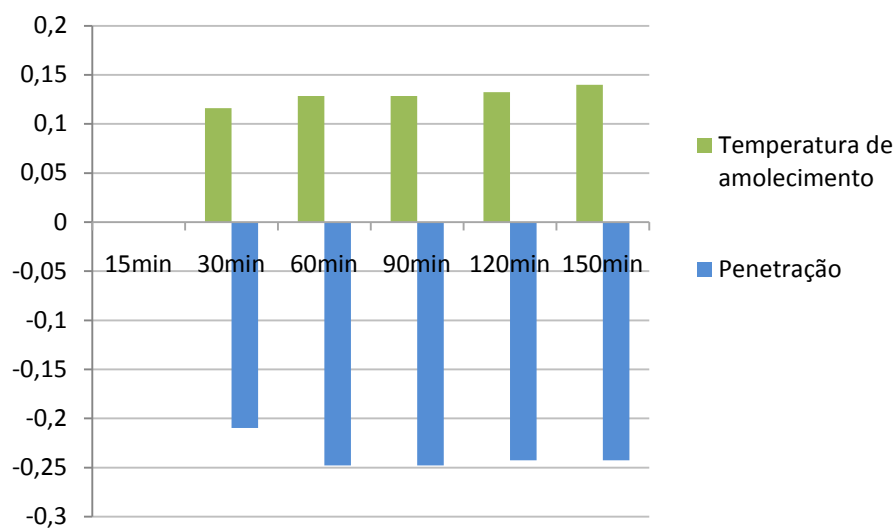


Figura 4.13 - Variação percentual da temperatura de amolecimento e penetração com 0,15% Cecabase®

O procedimento utilizado na determinação da viscosidade foi o mesmo descrito no B35/50 com 0,10% de Cecabase®.

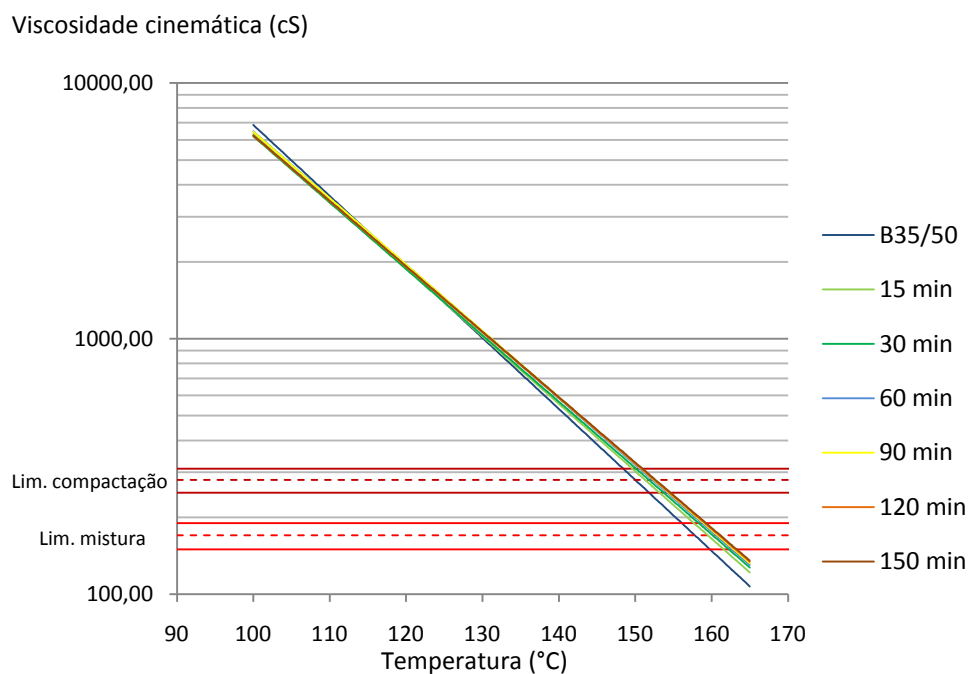


Figura 4.14 - Viscosidade das amostras B35/50 com 0,15% Cecabase®

Para uma temperatura de 100°C verifica-se uma diminuição de aproximadamente 900cSt da viscosidade em todas as amostras com 0,15% de aditivo face à viscosidade do B35/50 (figura 4.14). Nota-se ainda que quanto maior o tempo de agitação maior é a diminuição de viscosidade. A uma temperatura de 120°C as viscosidades encontram-se sobrepostas. Para 165°C ocorre o oposto aos 100°C de temperatura, quanto maior o tempo de agitação, maior é a viscosidade face ao B35/50, apresentando um aumento de cerca de 32cSt.

Denota-se pela linha de tendências de viscosidade do B35/50 uma temperatura de mistura de $\pm 158^{\circ}\text{C}$ e uma temperatura de compactação de $\pm 151^{\circ}\text{C}$. Para o B35/50 com 0,15% Cecabase[®] obteve-se uma temperatura de mistura de $\pm 161^{\circ}\text{C}$ e uma temperatura de compactação de $\pm 153^{\circ}\text{C}$.

4.4.3. B35/50 com 0,20% de Cecabase[®]

Para uma percentagem de 0,20 de Cecabase[®] manteve-se o procedimento de mistura descrito no protocolo experimental. Contudo, efectuou-se uma redução no número de amostras retiradas, analisando-se apenas aos 15, 30 e 60 minutos de agitação. Os resultados apresentam-se na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resultados obtidos para B35/50 com 0,20% de Cecabase[®]

		B35/50	B35/50 com 0,20% de Cecabase			
			15min	30min	Δ	60min
Pen (dmm)		50,9	-	38,3	-25%	39,7
AeB ($^{\circ}\text{C}$)		48,3	-	55,8	15%	55,9
Rec.El. (mm)		29,0	-	-	-	30,0
RTFOT	Δ massa (%)	-0,16	-	-	-	-0,07
	Pen (dmm)	28,8	-	-	-	24,3
	AeB ($^{\circ}\text{C}$)	60,2	-	-	-	61,9

Legenda: Pen – Penetração; AeB – Anel e Bola; Rec. El. – Recuperação elástica; Δ massa – variação de massa; Δ – variação em relação betume base

As amostras retiradas apresentaram uma diminuição de 22 e 25% na penetração, face ao valor obtido no betume base, enquanto as temperaturas de amolecimento apresentaram um aumento de 15 e 16%, como é possível observar na tabela 4.5. Relativamente à recuperação elástica o betume com aditivo apresenta um aumento de recuperação em 3%. Após o ensaio de envelhecimento (RTFOT) verificou-se um endurecimento do betume com aditivo, com uma diminuição da penetração e de um ligeiro aumento da temperatura de amolecimento.

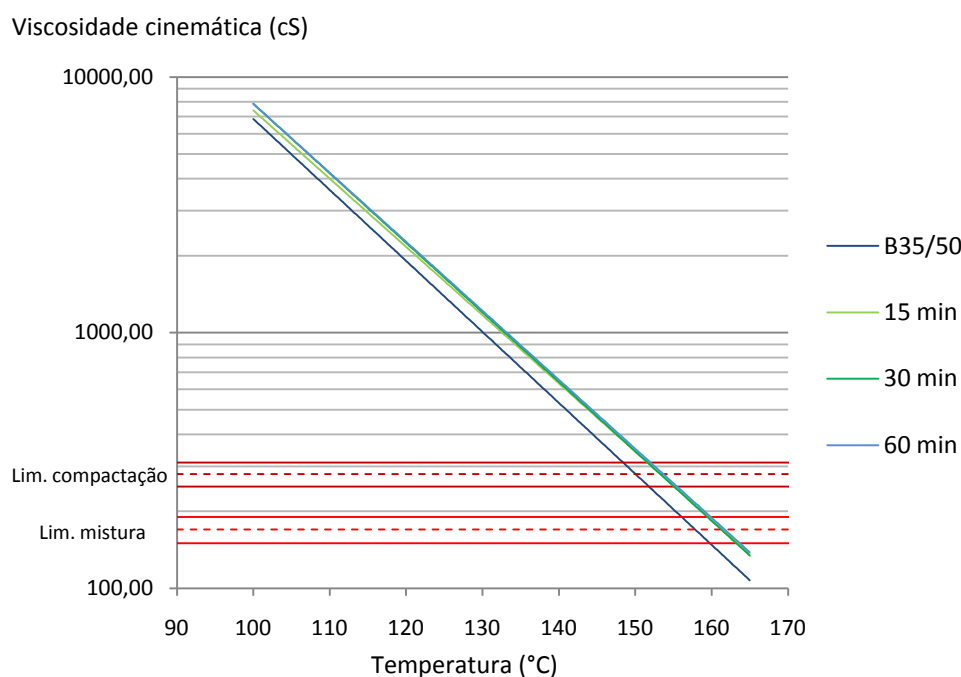


Figura 4.15 - Viscosidade das amostras B35/50 com 0,20% Cecabase®

A figura 4.15 apresenta as linhas de tendência da viscosidade das amostras as quais se encontram sobrepostas entre si e paralelas em relação ao B35/50. Para uma temperatura de 100°C apresentam um aumento de viscosidade de 900cSt enquanto para uma temperatura de 165°C o aumento é de aproximadamente 30cSt.

Pela análise da linha de tendências de viscosidade do B35/50 obtêm-se uma temperatura de mistura de $\pm 158^{\circ}\text{C}$ e uma temperatura de compactação de $\pm 151^{\circ}\text{C}$, enquanto para o B35/50 com 0,12% Cecabase® se obtêm uma temperatura de mistura de $\pm 162^{\circ}\text{C}$ e uma temperatura de compactação de $\pm 154^{\circ}\text{C}$.

4.4.4. B35/50 com 0,30% de Cecabase®

Para uma percentagem de 0,30 de Cecabase® e mantendo os procedimentos descritos para a percentagem de 0,20 obtiveram-se os resultados apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resultados obtidos para B35/50 com 0,30% de Cecabase®.

		B35/50	B35/50 com 0,30% de Cecabase				
			15min	30min	Δ	60min	Δ
Pen (dmm)		50,9	-	40,3	-21%	39,7	-22%
AeB (°C)		48,3	-	53,2	10%	53,4	11%
Rec.El. (mm)		29,0	-	-	-	30,0	3%
RTFOT	Δ massa (%)	-0,16	-	-	-	-0,17	-
	Pen (dmm)	28,8	-	-	-	23,7	-18%
	AeB (°C)	60,2	-	-	-	61,0	1%

Legenda: Pen – Penetração; AeB – Anel e Bola; Rec. El. – Recuperação elástica; Δ massa – variação de massa; Δ – variação em relação betume base

As amostras retiradas apresentaram uma diminuição de 21 e 22% na penetração, face ao valor obtido no betume base, enquanto as temperaturas de amolecimento apresentaram um aumento de 10 e 11%, como é possível observar na tabela 4.6. Relativamente à recuperação elástica o betume com aditivo apresenta um aumento de recuperação em 3%. Após o ensaio de envelhecimento (RTFOT) verificou-se um endurecimento do betume com aditivo, com uma diminuição de 18% da penetração e de um aumento de 1% na temperatura de amolecimento.

Para uma temperatura de 100°C verifica-se uma diminuição da viscosidade em todas as amostras com 0,30% de aditivo face à viscosidade do B35/50, como é possível verificar na figura 4.16 a diminuição é de 900cSt. Observa-se que quanto menor o tempo de agitação maior é a diminuição de viscosidade. A uma temperatura de 130°C as viscosidades encontram-se sobrepostas. Para 165°C quanto menor o tempo de agitação, maior é a viscosidade, apresentando um aumento de cerca de 30cSt.

Demonstra-se pela linha de tendências de viscosidade do B35/50 uma temperatura de mistura de $\pm 158^{\circ}\text{C}$ e uma temperatura de compactação de $\pm 151^{\circ}\text{C}$. Para o B35/50 com

0,30% Cecabase[®] evidencia-se uma temperatura de mistura de $\pm 161^{\circ}\text{C}$ e uma temperatura de compactação de $\pm 153^{\circ}\text{C}$.

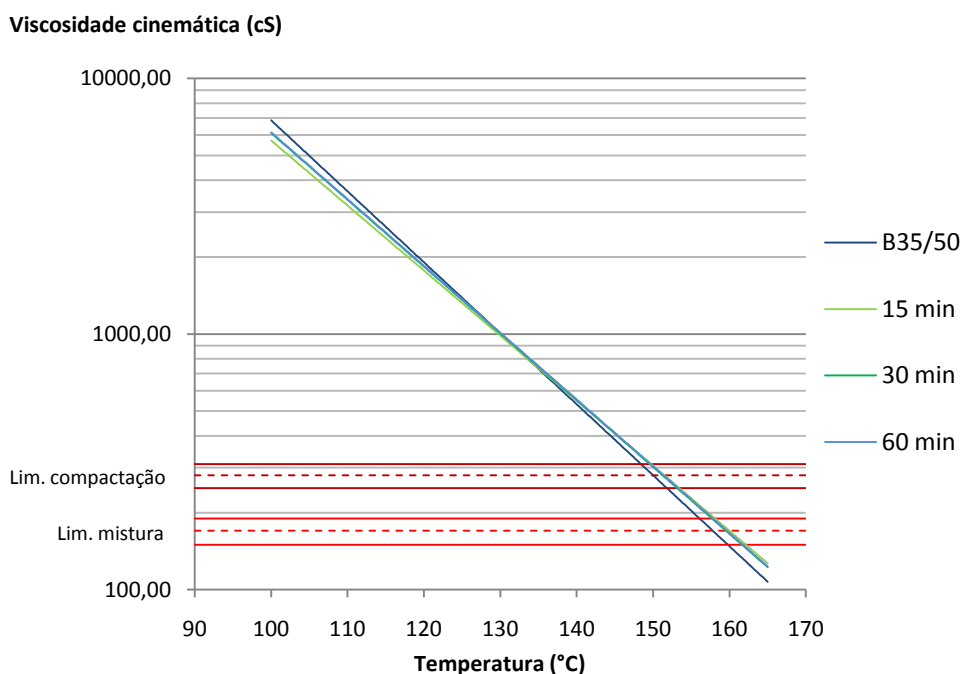


Figura 4.16 - Viscosidades das amostras B35/50 com 0,30% Cecabase[®]

4.4.5. Estabilidade ao armazenamento do B35/50 com Cecabase[®]

O estudo da estabilidade ao armazenamento foi efectuado de acordo com a norma EN 13399 (Cen 2003-c), este ensaio é bastante importante como meio de previsão do comportamento do betume durante o armazenamento, após a "modificação" com o aditivo.

Após a preparação e homogeneização da amostra de acordo com EN 12594 (Cen 2007-c), o betume "modificado" foi inserido dentro de um tubo de alumínio, e devidamente fechado sem a presença de ar no interior do tubo. Este foi colocado numa estufa a 180°C numa posição vertical durante três dias, ao fim deste período os tubos foram retirados da estufa e mantidos na vertical a arrefecer à temperatura ambiente. Depois de verificado o arrefecimento, levaram-se os tubos a uma refrigeração durante um dia, ao fim deste período a amostra foi removida do interior do tubo em estado sólido e dividida em três

partes iguais. A parte superior e inferior foram novamente aquecidas e ensaiadas na penetração (EN 1426) e na temperatura de amolecimento (EN 1427).

A tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos para o B35/50 “modificado” com as várias percentagens de Cecabase[®].

Tabela 4.7 - Estabilidade de armazenamento do B35/50 com Cecabase[®]

% Cecabase [®]	Estabilidade de armazenamento			
	Parte Inferior		Parte Superior	
	Pen (dmm)	AeB (°C)	Pen (dmm)	AeB (°C)
0,10%	41,0	53,7	40,1	53,7
0,15%	37,9	53,4	37,5	54,4
0,20%	40,7	55,1	41,0	56,3
0,30%	37,0	53,4	36,2	53,4

Legenda: Pen – Penetração; AeB – Anel e Bola

Os resultados obtidos demonstram uma boa homogeneização do B35/50 com Cecabase[®], ou seja, as variações são muito reduzidas entre a penetração da parte superior e da parte inferior. A mesma variação se verificou nas temperaturas de amolecimento.

4.4.6. Discussão dos resultados

O Cecabase[®] dissolveu-se rapidamente quando inserido no betume, como é possível verificar nas imagens microscópicas, no entanto a sua utilização provocou a libertação de um cheiro desagradável.

Como se pode constatar pelos resultados o Cecabase[®] teve um efeito de endurecimento do ligante, diminuindo a penetração em cerca de 22% e um aumento da temperatura de amolecimento em cerca de 12%. Este endurecimento do betume “modificado” implica no aumento da viscosidade. Representados esses aumentos nos gráficos de viscosidade, surge por consequência o aumento da temperatura de mistura e de compactação em cerca de 3°C.

Estes valores não eram os esperados. Previam-se valores bastante próximos dos valores obtidos para o betume base. No entanto, devido ao manuseamento do betume a uma

temperatura elevada (175°C) e o constante contacto com o ar, poderá ter ocorrido reacções de oxidação entre os compostos do betume, assim como a volatilização de alguns componentes dos mesmos.

Após o ensaio de envelhecimento (RTFOT) as diferenças apresentadas na penetração e temperatura de amolecimento pelas várias percentagens de aditivo, demonstraram um endurecimento em relação ao betume base, a nível da penetração.

Em relação à estabilidade ao armazenamento não existem grandes diferenças de comportamento entre as múltiplas percentagens do Cecabase[®]. Mantendo-se a mesma percentagem de aditivo (parte superior e inferior), confirmando a não alteração do betume durante a fase de armazenamento.

4.5. Resultados do B35/50 com RedisetTM WMX

Na mistura do betume base 35/50 com o RedisetTM WMX testaram-se quatro percentagens de aditivo (1,0%; 1,5%; 2,0% e 3,0%), seguindo o protocolo experimental anteriormente apresentado.

Para 1,0% de RedisetTM WMX retiraram-se amostras aos 15, 30, 60, 90, 120 e 150 minutos, como verificação da possível alteração das propriedades do ligante para tempos de agitação superiores. Para 1,5%, 2,0% e 3,0% retiraram-se amostras aos 15, 30 e 60 minutos.

4.5.1. B35/50 com 1,0% de RedisetTM WMX

Os resultados dos ensaios de penetração, temperatura de amolecimento, recuperação elástica e RTFOT para os diversos tempos de agitação das amostras encontram-se na tabela 4.8.

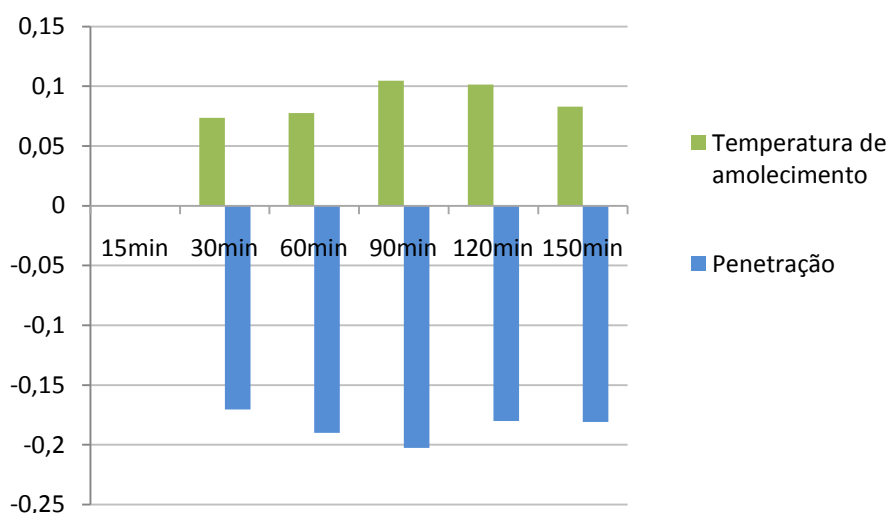
Neste estudo manteve-se todo o procedimento, aplicado para 0,10% e 0,15% de Cecabase[®] como meio de verificação de alteração do B35/50 para 150 minutos de agitação.

Tabela 4.8 - Resultados obtidos para B35/50 com 1,0% de Rediset™ WMX

		B35/50	B35/50 com 1,0% de Rediset™ WMX										
			15min	30min	Δ	60min	Δ	90min	Δ	120min	Δ	150min	Δ
Pen (dmm)		50,9	-	44,7	-12%	44,2	-13%	42,5	-16%	45,3	-11%	44,1	-13%
AeB (°C)		48,3	-	55,9	16%	54,3	12%	54,0	12%	54,4	13%	56,5	17%
Rec.El. (mm)		29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28,5	-2%
RTFOT	Δ massa (%)	-0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,06	-
	Pen (dmm)	28,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,3	-5%
	AeB (°C)	60,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,7	-2%

Legenda: Pen – Penetração; AeB – Anel e Bola; Rec. El. – Recuperação elástica; Δ massa – variação de massa; Δ – variação em relação ao betume base

Os ensaios de penetração apresentaram uma diminuição em relação ao B35/50 de -12 a -16%, para as temperaturas de amolecimento verificou-se o inverso, ou seja um aumento entre 12 e 17% (figura 4.17). O ensaio da recuperação elástica revelou uma diminuição da capacidade de recuperação do B35/50, de aproximadamente 2%. No ensaio de envelhecimento obteve-se uma menor variação de massa do ligante e uma diminuição da penetração e da temperatura de amolecimento.

**Figura 4.17 - Variação percentual da temperatura de amolecimento e penetração com 1,0% Rediset™ WMX**

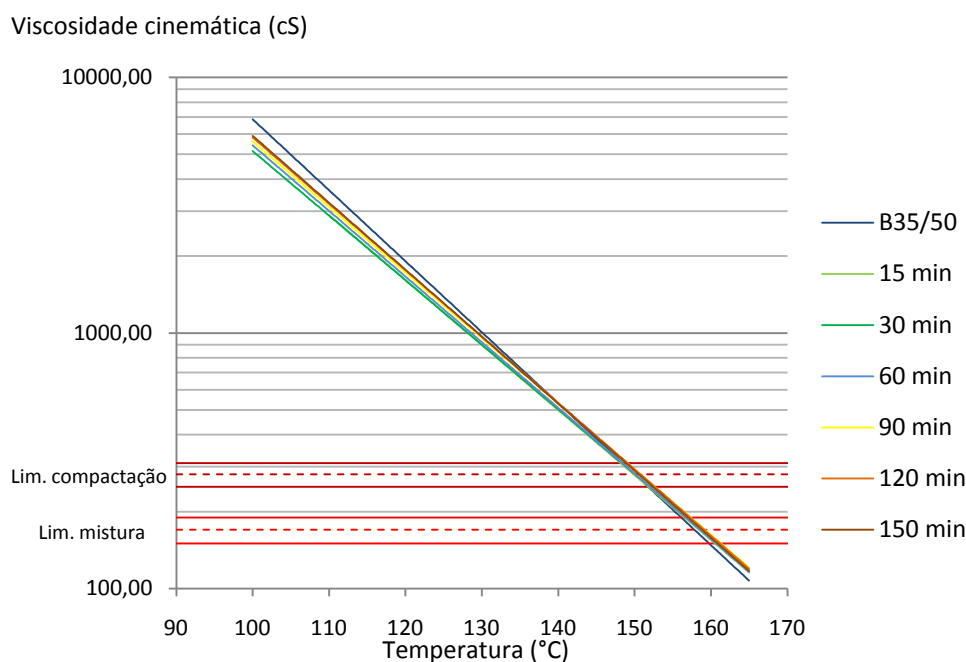


Figura 4.18 - Viscosidade das amostras B35/50 com 1,0% Rediset™ WMX

A adição do Rediset™ WMX no B35/50 provocou, para a temperatura de 100°C, uma diminuição da viscosidade (figura 4.18) em todas as amostras, apresentando um ligeiro aumento da viscosidade desde a amostra dos 15 minutos até aos 150 minutos, aproximadamente 800cSt. Para a temperatura de 165°C verifica-se uma viscosidade igual em todas as amostras, no entanto apresentam uma viscosidade superior ao B35/50, aproximadamente 20cSt.

As temperaturas de mistura e de compactação obtidas para as amostras e para o betume 35/50 são de $\pm 158^{\circ}\text{C}$ para uma temperatura de mistura e de $\pm 151^{\circ}\text{C}$ uma temperatura de compactação.

4.5.2. B35/50 com 1,5%, 2,0% e 3,0% de Rediset™ WMX

Os tempos de amostragem para este conjunto de ensaios foram reduzidos para 15, 30 e 60 minutos, seguindo a metodologia utilizada nos ensaios anteriores, após verificar-se que,

para 1,0% de Rediset™ WMX, as temperaturas de mistura e compactação não divergiam com os tempos de agitação,

Tabela 4.9 - Resultados obtidos para o B35/50 com 1,5%, 2,0% e 3,0% de Rediset™ WMX

		B35/50	1,5% de Rediset™ WMX				2,0% de Rediset™ WMX				3,0% de Rediset™ WMX			
			30min	Δ	60min	Δ	30min	Δ	60min	Δ	30min	Δ	60min	Δ
Pen (dmm)		50,9	41,7	-18%	43,0	-15%	35,40	-30%	32,0	-37%	40,3	-21%	39,7	-22%
AeB (°C)		48,3	55,7	15%	56,6	17%	53,90	12%	54,4	13%	53,2	10%	53,4	11%
Rec.El. (mm)		29,0	-	-	25,0	-14%	-	-	26,0	-10%	-	-	30,0	3%
RTFOT	Δ massa (%)	-0,16	-	-	-0,12	-	-	-	-0,17	-	-	-	-0,17	-
	Pen (dmm)	28,8	-	-	20,8	-28%	-	-	25,8	-10%	-	-	23,6	-18%
	AeB (°C)	60,2	-	-	60,3	0%	-	-	58,6	-3%	-	-	61,0	1%

Legenda: Pen – Penetração; AeB – Anel e Bola; Rec. El. – Recuperação elástica; Δ massa – variação de massa; Δ – variação em relação ao betume base

Como se pode verificar na tabela 4.9 a junção do Rediset™ WMX provoca um endurecimento do B35/50. Verificou-se uma diminuição da penetração em todas as percentagens analisadas, sendo que para 2,0% essa diminuição foi de 37% ao fim de 60 minutos de agitação. As temperaturas de amolecimento apresentam-se com valores superiores em relação ao B35/50, verifica-se também que quanto maior a percentagem de Rediset™ WMX adicionado menor é a variação da temperatura. Para as duas primeiras percentagens analisadas verificou-se uma diminuição da capacidade de recuperação do betume, no entanto para os 3,0% a recuperação elástica é semelhante à do B35/50.

Os valores obtidos no ensaio de envelhecimento, não revelaram diferenças significativas na variação de massa e na temperatura de amolecimento após efectuado o envelhecimento, porém, verificou-se um aumento da capacidade de resistência do betume no ensaio da penetração, sendo que para 1,5% essa resistência foi de 28%.

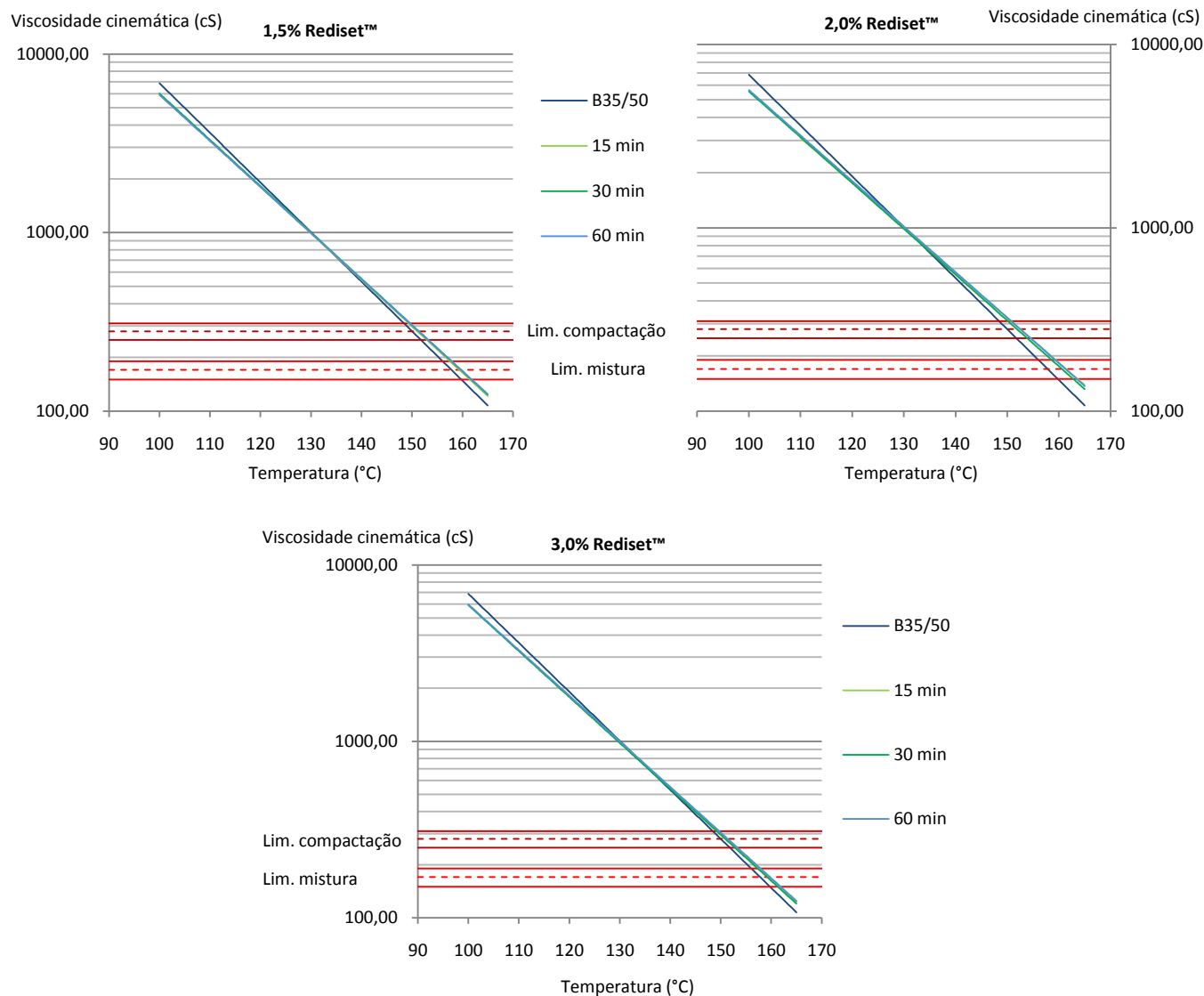


Figura 4.19 - Viscosidade das amostras B35/50 com 1,5%, 2,0% e 3,0% de Rediset™ WMX

Os gráficos representados na figura 4.19 apresentam as viscosidades do B35/50 com diferentes percentagens de Rediset™ WMX. Para as diferentes percentagens de aditivo, verificou-se que este provocou, para a temperatura de 100°C, uma diminuição da viscosidade em todas as amostras. Para a temperatura de 165°C verifica-se um aumento da viscosidade nas diferentes percentagens analisadas, comparado com o B35/50. As temperaturas de mistura e de compactação obtidas são: aproximadamente 161°C para uma temperatura de mistura e cerca de 152°C a temperatura de compactação, apresentando um aumento de aproximadamente 2°C em relação ao B35/50.

4.5.3. Estabilidade de armazenamento do B35/50 com Rediset™ WMX

Na tabela 4.10 representam-se os resultados obtidos na estabilidade de armazenamento para as diferentes percentagens de Rediset™ WMX no B30/50.

Tabela 4.10 - Estabilidade de armazenamento do B35/50 com Rediset™ WMX

% Rediset™WMX	Estabilidade de armazenamento			
	Parte Inferior		Parte Superior	
	Pen (dmm)	AeB (°C)	Pen (dmm)	AeB (°C)
1,0%	38,2	54,5	35,9	54,3
1,5%	39,3	53,2	37,1	54,1
2,0%	45,1	52,7	41,9	53,5
3,0%	48,0	54,5	46,0	54,6

Legenda: Pen – Penetração; AeB – Anel e Bola

Seguindo criteriosamente os procedimentos de preparação das amostras e de ensaio de estabilidade de armazenamento, verificaram-se algumas diferenças entre as penetrações correspondentes às partes superiores e inferiores dos tubos. A parte superior apresentou-se com uma maior dureza, de cerca 2dmm, durante os ensaios de penetração em comparação com a parte inferior. Nos ensaios da temperatura de amolecimento a diferença é de cerca 1°C, apenas para as duas percentagens intermédias, sendo que a parte superior apresenta o valor superior em relação à parte inferior.

4.5.4. Discussão dos resultados B35/50

O B35/50 apresentou um endurecimento após a adição do Rediset™, sendo que para a percentagem de 2,0 essa diferença foi superior (>15%) em comparação com as restantes percentagens.

O endurecimento do ligante é compreensível, uma vez que o ligante fica sujeito à temperatura de 175°C durante bastante tempo (tendo em conta a massa), permitindo ocorrência de processos irreversíveis de oxidação e/ou a volatilização dos componentes

mais leves. No entanto, seria de esperar um maior endurecimento por parte do betume aditivado com 1,0%, uma vez este esteve sujeito a um maior tempo de agitação e por consequência está mais susceptível aos fenómenos atrás mencionados. Contudo, verificou-se que a maior diferença registou-se na amostra de betume com 2,0% de Rediset™, o qual esteve apenas sujeito a 60 minutos de agitação, sendo o procedimento efectuado exactamente igual aos das restantes amostras. Essa grande diferença no endurecimento também é reflectida na viscosidade, onde se denota um aumento da viscosidade e por consequência o aumento da temperatura de mistura e compactação, quando comparadas com as do betume base e as restantes amostras, que apresentam uma diminuição da viscosidade para uma temperatura de 100°C e um ligeiro aumento para temperaturas superiores 150°C.

Após o ensaio de RTFOT, o betume aditivado revelou um maior endurecimento em todas as percentagens. No entanto, o ensaio da temperatura de amolecimento apresentou resultados próximos aos do B35/50.

O ensaio de estabilidade de armazenamento não apresentou diferenças significativas, podendo-se confirmar a não alterabilidade do betume com Rediset™, durante o armazenamento e transporte.

4.6. Resultados do BBM 35/50

Para a realização do estudo do betume modificado com borracha, o BBM35/50 com teor médio de borracha (entre 8 e 15%), manteve-se o protocolo experimental mencionado no ponto 4.3, mas consideram-se apenas os tempos de 15, 30 e 60 minutos de agitação. Sendo que para os 15 minutos retirou-se uma amostra para o estudo da viscosidade dinâmica, para o tempo de 30 minutos acrescentou-se o ensaio da penetração e da temperatura de amolecimentos e para o último tempo acrescentou-se o ensaio da recuperação elástica, estabilidade ao armazenamento e o RTFOT.

4.6.1. BBM 35/50 com Cecabase®

Tabela 4.11 - Resultados obtidos para o BBM 35/50 com Cecabase®

		Cecabase®																
		0,10%				0,15%				0,20%				0,30%				
BBM 35/50		30min	Δ (%)	60min	Δ (%)	30min	Δ (%)	60min	Δ (%)	30min	Δ (%)	60min	Δ (%)	30min	Δ (%)	60min	Δ (%)	
Pen. (dmm)		38,2	33,0	-14	32,6	-15	33,3	-13	31,0	-19	36,73	-4	34,8	-9	37,6	-2	35,1	-8
AeB (°C)		88,0	88,8	1	93,1	6	85,5	-3	92,8	6	87,00	-1	89,9	2	83,9	-5	88,4	0
Rec.El. (mm)		185,5	-	-	184,0	-1	-	-	182,5	-2	-	-	182,5	-2	-	-	181,5	-2
RTFOT	Δ massa (%)	0,18	-	-	0,13	-	-	-	0,17	-	-	-	0,23	-	-	-	0,23	-
	Pen (dmm)	26,9	-	-	22,5	-16	-	-	23,0	-14	-	-	23,3	-13	-	-	27,9	4
	AeB (°C)	92,0	-	-	92,5	1	-	-	90,9	-1	-	-	89,5	-3	-	-	83,4	-9

Legenda: Pen – Penetração; AeB – Anel e Bola; Rec. El. – Recuperação elástica; Δ massa – variação de massa; Δ – variação em relação ao betume base

Numa análise aos valores obtidos na tabela 4.11 é possível verificar-se uma diminuição da penetração entre os 30 e os 60 minutos de agitação e por consequência uma variação oposta no ensaio da temperatura de amolecimento. Quanto à recuperação elástica denota-se uma diminuição da recuperação com o aumento da percentagem de aditivo. Após a realização do ensaio de envelhecimento (RTFOT) verificou-se um endurecimento do BBM 35/50 sendo que para a percentagem de 0,3 de aditivo esse endurecimento foi menor. Verificando-se também uma maior diminuição da temperatura de amolecimento.

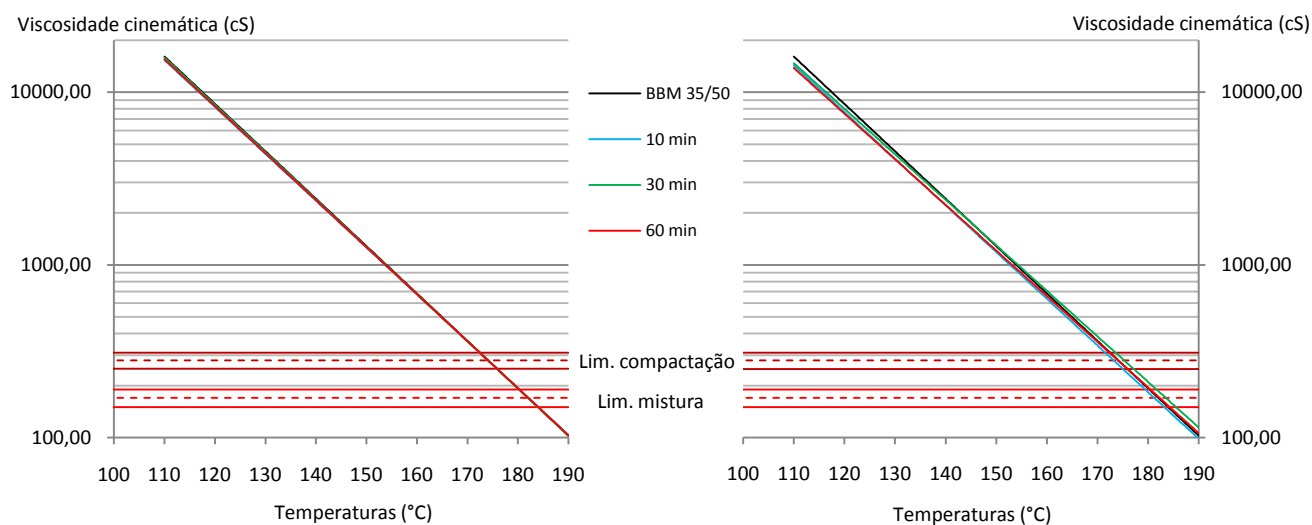


Figura 4.20 – Viscosidade das amostras do BBM 35/50 com 0,10 e 0,15% de Cecabase®

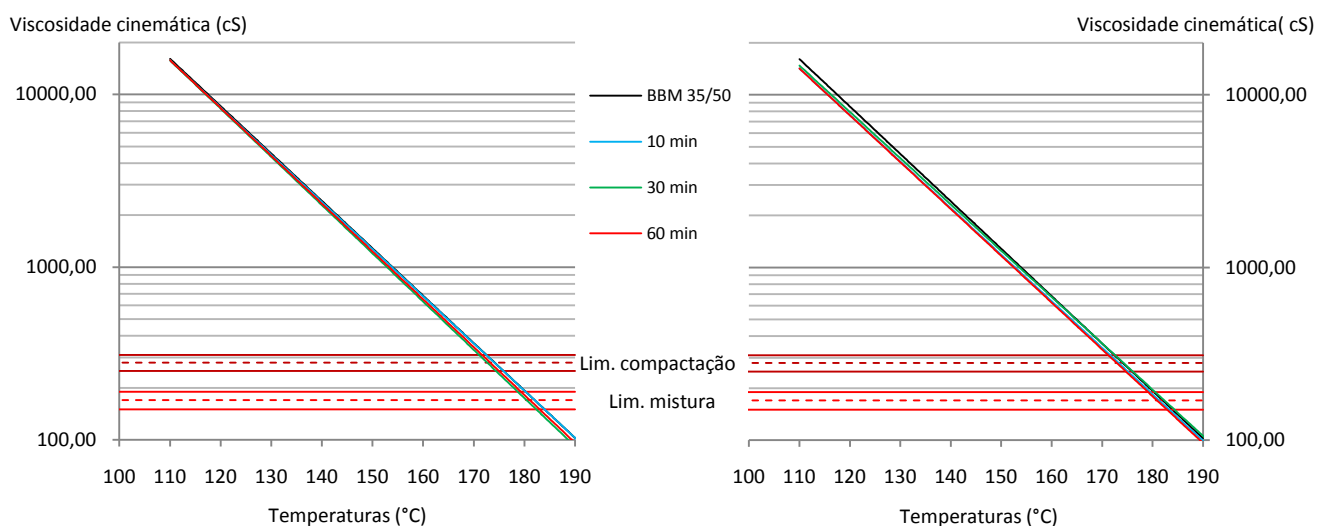


Figura 4.21 - Viscosidade das amostras do BBM 35/50 com 0,20 e 0,30% de Cecabase®

Na determinação da viscosidade utilizou-se o mesmo procedimento atrás descrito (4.4.1), no entanto devido à probabilidade de sedimentação da borracha durante a realização do ensaio da viscosidade dinâmica (EN 13302), alterou-se o tempo de estabilização para 5 minutos de após a activação do *spindle* e durante os 3 minutos seguintes retiraram-se os valores da viscosidade e tensão de corte.

Os valores obtidos para as viscosidades encontram-se representados na figura 4.20 e na figura 4.21. A adição do aditivo não provocou variações consideráveis da viscosidade em relação ao betume base, verificando-se uma sobreposição das linhas de viscosidade,

obtendo-se uma temperatura de mistura de aproximadamente 183°C e uma temperatura de compactação de cerca de 174°C.

4.6.2. BBM 35/50 com Rediset™ WMX

Na tabela 4.12 representam-se os resultados obtidos para as diferentes percentagens testadas.

Tabela 4.12 - Resultados obtidos para o BBM 35/50 com Rediset™ WMX

		Rediset™ WMX																
BBM 35/50		1,0%				1,5%				2,0%				3,0%				
		30min	Δ (%)	60min	Δ (%)	30min	Δ (%)	60min	Δ (%)	30min	Δ (%)	60min	Δ (%)	30min	Δ (%)	60min	Δ (%)	
Pen. (dmm)		38,2	31,2	-18	31,2	-18	34,1	-11	32,4	-15	35,2	-8	33,9	-11	37,5	-2	36,2	-5
AeB (°C)		88,0	88,2	0	94,3	7	91,0	3	94,5	7	93,4	6	92,6	5	94,1	7	98,2	12
Rec.El. (mm)		185,5	-	-	183,0	-1	-	-	185,0	0	-	-	184,0	-1	-	-	183,5	-1
RTFOT	Δ massa (%)	-0,18	-	-	-0,17	-	-	-	-0,21	-	-	-	-0,20	-	-	-	-0,17	-
	Pen (dmm)	26,9	-	-	26,5	-1	-	-	26,2	-2	-	-	25,4	-6	-	-	24,8	-8
	AeB (°C)	92,0	-	-	92,4	0	-	-	92,9	1	-	-	91,9	0	-	-	88,4	-4

Legenda: Pen – Penetração; AeB – Anel e Bola; Rec. El. – Recuperação elástica; Δ massa – variação de massa; Δ – variação em relação ao betume base

A junção do aditivo Rediset™ WMX ao BBM35/50 permitiu uma diminuição da penetração e aumento da temperatura de amolecimento. Os resultados da tabela 4.12 comprovam o endurecimento do betume, sendo que para 3,0% de Rediset™ WMX esse endurecimento é reduzido como verificado pelo ensaio da penetração. No entanto para a temperatura de amolecimento detecta-se um aumento em cerca de 10,0°C. Para as percentagens estudadas, os valores obtidos aos 30 minutos não diferem muito em relação aos obtidos para os 60 minutos.

A capacidade da recuperação elástica do BBM 35/50 não aparenta sofrer alterações com o aditivo. O mesmo se verifica com o envelhecimento (RTFOT), em que os valores obtidos não apresentam diferenças significativas em comparação com o BBM 35/50.

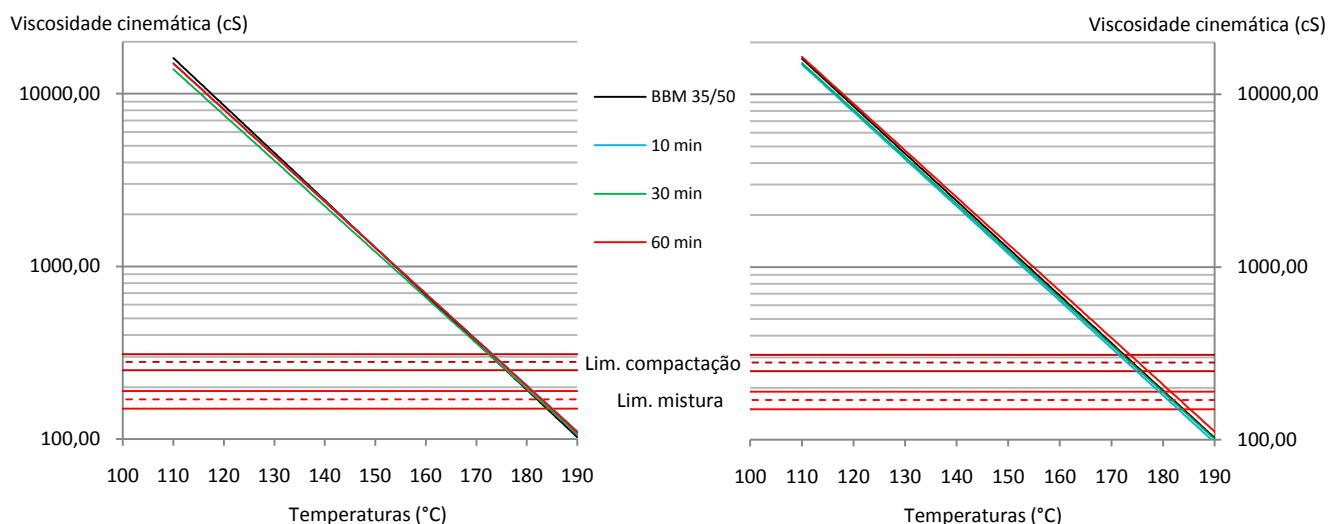


Figura 4.22 - Viscosidade das amostras do BBM 35/50 com 1,0 e 1,5% de Rediset™ WMX

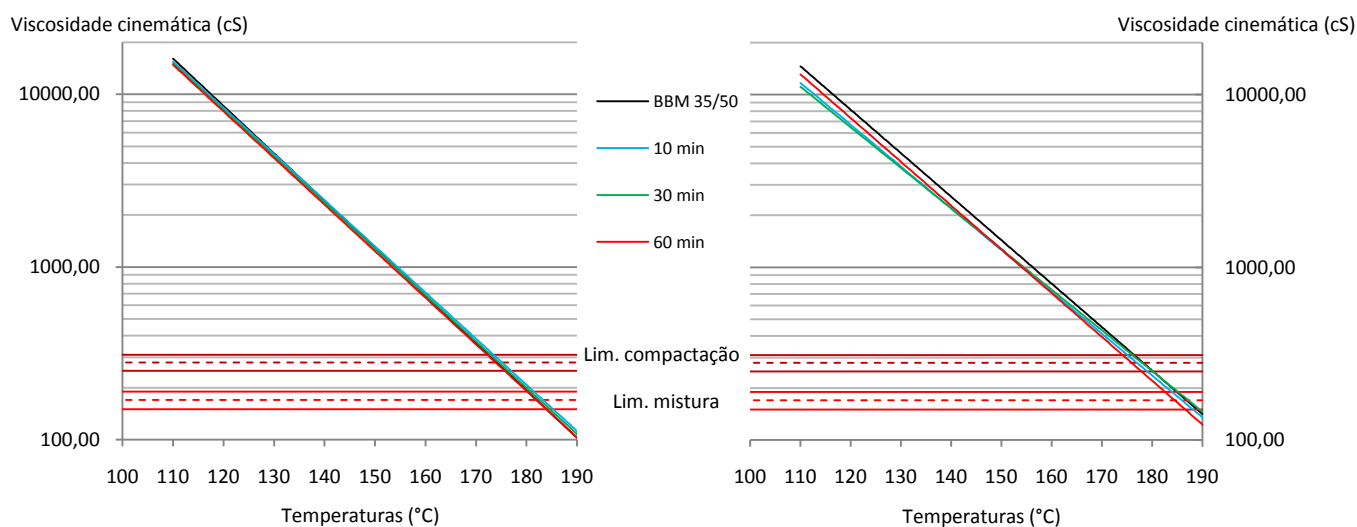


Figura 4.23 - Viscosidade das amostras do BBM 35/50 com 2,0 e 3,0% de Rediset™ WMX

A figura 4.22 e a figura 4.23 apresentam as linhas de tendências obtidas para a viscosidade do BBM 35/50 para as diferentes percentagens de aditivo. A adição do aditivo não revelou variações consideráveis da viscosidade em relação ao betume base, verificando-se uma sobreposição das linhas de viscosidade, obtendo-se uma temperatura de mistura de ceca de 183°C e uma temperatura de compactação de aproximadamente 174°C.

4.6.3. Discussão dos resultados BBM 35/50

O BBM 35/50 com Cecabase[®] apresentou ligeiras diferenças nos ensaios de penetração para as duas primeiras percentagens estudadas. Para as restantes percentagens e ensaios, essas diferenças não foram significativas. Seria de esperar uma maior viscosidade para as amostras de 0,10% e 0,15%, no entanto tal não ocorreu, as linhas de tendências da viscosidade encontram-se praticamente sobrepostas.

O BBM 35/50 com Rediset[™] revelou diferenças nos ensaios de penetração em três percentagens (1,0; 1,5 e 2,0) em comparação com o betume sem aditivo. No entanto, os ensaios de temperatura de amolecimento não revelaram tal tendência, assim como os restantes ensaios apresentaram diferenças muito reduzidas.

4.7. Resultados do betume 10/20

Na realização dos estudos do B10/20, foi mantido o protocolo experimental descrito no ponto 4.3, apenas se efectuando a agitação durante 30 minutos com análise do comportamento do betume com os dois aditivos, para as diferentes percentagens.

4.7.1. Betume 10/20 com Cecabase®

Nos ensaios realizados com este aditivo, obtiveram-se os resultados representados na tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Resultados obtidos para B10/20 com Cecabase®

		B10/20	B10/20 com Cecabase®							
			0,10%	Δ	0,15%	Δ	0,20%	Δ	0,30%	Δ
Pen (dmm)		17,53	18,6	6%	18,9	8%	18,2	4%	16,8	-4%
AeB (°C)		65,20	65,1	0%	64,9	-1%	65,4	0%	65,1	0%
RTFOT	Δ massa (%)	-0,21%	-0,27%	-	-0,19%	-	-0,30%	-	-0,27%	-
	Pen (dmm)	12,03	12,2	1%	11,9	-1%	13,2	10%	13,5	13%
	AeB (°C)	71,10	71,9	1%	72,1	1%	72,6	2%	73,0	3%

Legenda: Pen – Penetração; AeB – Temperatura de amolecimento; Rec. El. – Recuperação elástica; Δ massa – variação de massa; Δ – variação em relação B10/20

Como evidenciado na tabela 4.13, a penetração apresentou um aumento nas três primeiras percentagens, enquanto verificou-se o oposto para a última percentagem. A variação obtida no ensaio da temperatura de amolecimento é nula para 0,10%, 0,20% e 0,30% de Cecabase®, para 0,15% Cecabase® verifica-se uma diminuição da temperatura em 1%. Após o ensaio do RTFOT verifica-se uma redução da massa dos betumes, sendo que para as duas primeiras percentagens analisadas a variação dos resultados em relação ao B10/20 é de $\pm 1\%$. Nas restantes percentagens verifica-se um aumento da penetração de 10 a 13% e um aumento da temperatura de amolecimento de 2 a 3%.

O ensaio de recuperação elástica não apresentou valores válidos, uma vez que a amostra quebrava sempre antes de atingir os 100 milímetros de extensão.

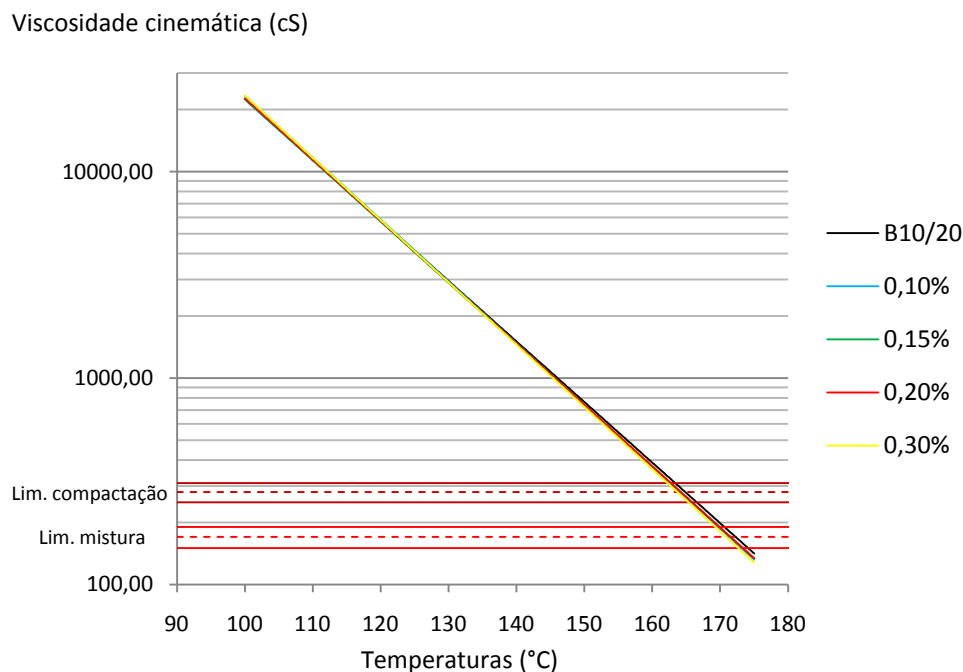


Figura 4.24 - Viscosidade das amostras B10/20 com Cecabase®

Os valores de viscosidade não apresentaram grandes mudanças em comparação com o B10/10, como é possível verificar-se na figura 4.24, as linhas de viscosidade encontram-se muito próximas, evidenciando uma temperatura de mistura próxima dos 173°C e uma temperatura de compactação próxima dos 165°C.

4.7.2. Betume 10/20 com Rediset™ WMX

Na tabela 4.14 representam-se os resultados obtidos nos ensaios para as diferentes percentagens de Rediset™ WMX.

Tabela 4.14 - Resultados obtidos para B10/20 com Rediset™ WMX

		B10/20	B10/20 com Rediset™ WMX							
			1,0%	Δ	1,5%	Δ	2,0%	Δ	3,0%	Δ
Pen (dmm)		17,5	16,00	-9%	15,7	-10%	18,1	3%	18,5	6%
AeB (°C)		65,2	64,8	-1%	64,6	-1%	65,9	1%	66,3	2%
RTFOT	Δ massa (%)	-0,21%	-0,29%	-	-0,40%	-	-0,40%	-	-0,36%	-
	Pen (dmm)	12,0	11,7	-2%	13,2	10%	13,8	15%	12,8	7%
	AeB (°C)	71,1	72,2	2%	74,4	5%	74,3	5%	73,4	3%

Legenda: Pen – Penetração; AeB – Temperatura de amolecimento; Rec. El. – Recuperação elástica; Δ massa – variação de massa; Δ – variação em relação betume base

Verifica-se que para as duas primeiras percentagens analisadas o aditivo apresentou um endurecimento na ordem dos 10%, no entanto para os 2,0 e 3,0% verificou-se um amolecimento do ligante. Os valores da temperatura de amolecimento revelam uma variação reduzida em relação ao B10/20.

Realizado o ensaio de envelhecimento, verificou-se o endurecimento do betume com 1,0% de Rediset™ WMX, apresentando uma diminuição da penetração e um aumento da temperatura de amolecimento de 2%. Para as restantes percentagem testadas, constatou-se um amolecimento do betume, a penetração sofre um aumento entre 7 e 15% e a temperatura de amolecimento entre 3 e 5%.

O ensaio de recuperação elástica não apresentou valores validos, uma vez que a amostra quebrava sempre antes de atingir os 100 milímetros de extensão.

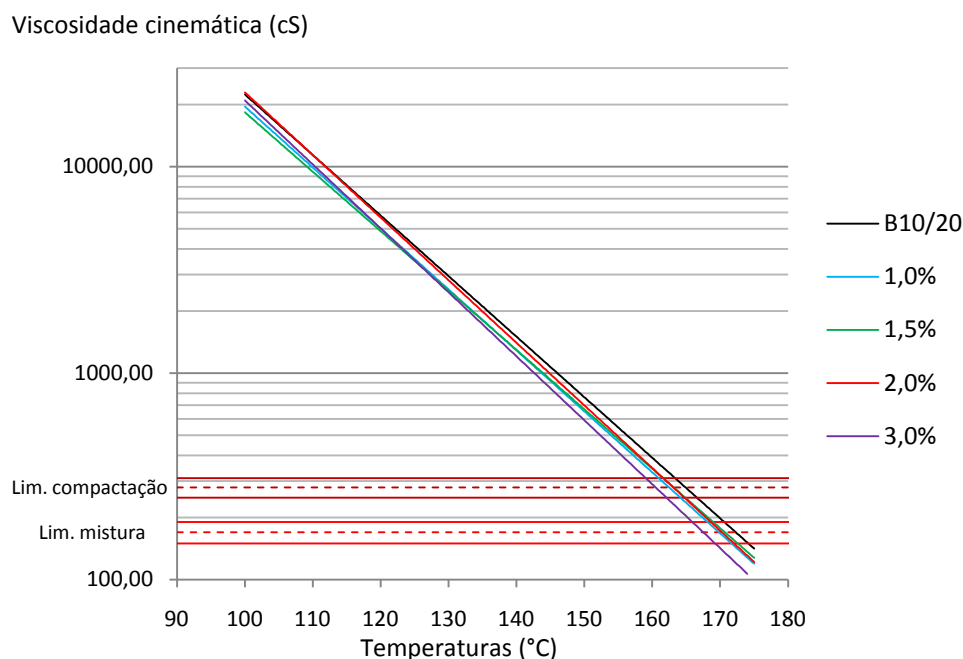


Figura 4.25 - Viscosidades das amostras B10/20 com Rediset™ WMX

Para uma temperatura de 100°C verifica-se uma diminuição da viscosidade (figura 4.25) em três percentagens (1,0%; 1,5%; 3,0%), enquanto para os 2,0% existe uma proximidade à viscosidade do B10/20. Para uma temperatura de 175°C todas as percentagens apresentaram uma viscosidade inferior em relação ao B10/20, sendo que as três primeiras percentagens apresentaram uma diferença de $\pm 20 \text{ cSt}$ enquanto para a percentagem dos 3,0% se obteve uma diferença de viscosidade de $\pm 50 \text{ cSt}$.

Como resultado obteve-se uma temperatura de mistura de $\pm 168^\circ\text{C}$ e uma temperatura de compactação de $\pm 161^\circ\text{C}$ para os 3,0% de aditivo. Para as restantes percentagens obteve-se uma temperatura de mistura de $\pm 171^\circ\text{C}$ e uma temperatura de compactação de $\pm 164^\circ\text{C}$, ou seja, cerca de 2°C abaixo das temperaturas obtidas no betume base.

4.7.3. Discussão dos resultados B10/20

O B10/20 com Cecabase® não apresentou diferenças significativas nos ensaios de penetração e temperatura de amolecimento em relação ao betume base. As viscosidades

encontram-se praticamente sobrepostas para todas as amostras, obtendo-se a mesma temperatura na fase de mistura e de compactação, o que comprova que o aditivo não altera a viscosidade do ligante.

Em relação às amostras aditivadas com Rediset™ evidenciaram-se resultados semelhantes aos obtidos no betume base, na penetração e temperatura de amolecimento. A perda de massa após o ensaio de envelhecimento acelerado foi superior que a registada no betume base, apresentando uma diferença de 0,10 a 0,20%. As viscosidades apresentaram valores inferiores quando comparados com os do betume base. Essa diminuição evidencia-se para a percentagem de 3,0%.

Dos dois aditivos utilizados o que apresentou uma menor alteração das propriedades do betume base foi o Cecabase®.

4.8. Discussão geral dos resultados

Como referido no ponto 2.3 o betume é constituído por quatro grupos: os saturados, os aromáticos, os asfaltenos e as resinas. Os saturados e os aromáticos constituem as moléculas mais leves e quando sujeitos a um aumento de temperatura, poderá ocorrer a sua volatilização e por consequência levar ao endurecimento do ligante. As resinas e os asfaltenos apresentam uma maior susceptibilidade a reacções de oxidação, ou seja, quanto maior o contacto com o oxigénio maior é o endurecimento, maior a temperatura de amolecimento e maior a viscosidade do ligante.

As normas europeias para as misturas betuminosas, EN 13108-1/7 (Cen 2006), em vigor desde Março de 2006, estipulam um limite de temperatura entre 150 e 190°C para a utilização do betume convencional 35/50, enquanto os restantes ligantes utilizados não constam nesta norma. Os valores obtidos durante a análise destes últimos (BBM35/50 e B10/20) apontam para valores entre 160 e 200°C.

Neste trabalho considerou-se uma temperatura de 175°C para a execução do procedimento experimental, sendo obtida uma variação de $\pm 5^\circ\text{C}$ ao longo do procedimento, ou seja, uma temperatura próxima do limite superior do B35/50. Devido à utilização de uma

temperatura próxima da temperatura máxima do ligante, podem, em alguns casos, ter ocorrido as reacções já mencionadas e que contribuíram para o endurecimento do betume.

Na figura 4.26 encontram-se representados os valores médios de penetração e da temperatura de amolecimento, antes e após RTFOT, para os diferentes ligantes utilizados com Cecabase[®]. Esta figura permite ter-se uma melhor perspectiva das diferenças de valores dos ligantes com o aditivo e o ligante “base”.

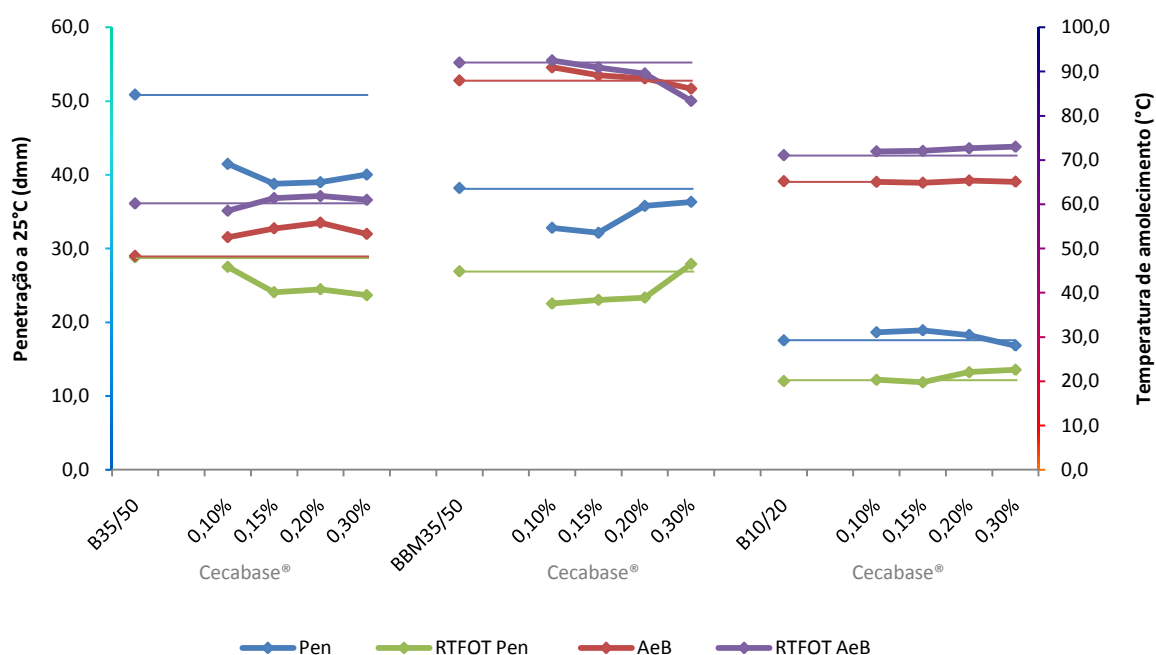


Figura 4.26 – Resultados da penetração e da temperatura de amolecimento

Da análise da figura 4.26 pode verificar-se um endurecimento do ligante com o aditivo, excepto no B10/20, em que existe uma proximidade entre os valores do betume base e com o aditivo. É perceptível uma maior diferença no B35/50 aditivado, em que ocorre uma diminuição da penetração em cerca de 10dmm e um aumento da temperatura de amolecimento de aproximadamente 5°C. Após RTFOT a penetração tende a diminuir com o aumento de aditivo, no entanto a temperatura de amolecimento é muito próxima da temperatura do betume base, sendo que o B35/50 com 0,10% de Cecabase[®] é o que apresenta uma menor variação dos resultados.

O BBM35/50 aditivado revela uma diminuição da penetração. Contudo, quanto maior a percentagem de aditivo, menor é a diferença entre os resultados obtidos, em comparação com o betume modificado com borracha sem aditivo.

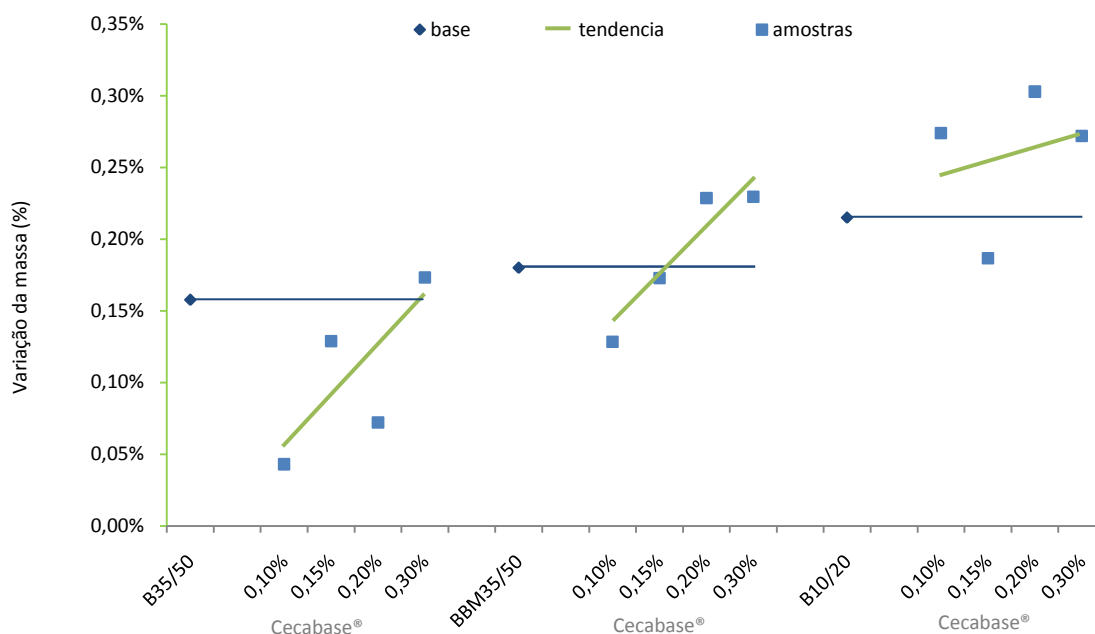


Figura 4.27 - Variação da massa dos ligantes após RTFOT

O ensaio de envelhecimento acelerado permitiu determinar a perda de massa dos ligantes, encontrando-se os resultados representados na figura 4.27. A percentagem da variação da massa dos ligantes foi calculada pela diferença entre a massa do betume antes do ensaio de RTFOT e após execução do mesmo. Os resultados obtidos apresentam uma variação de aproximadamente 0,15%, sendo que para este ensaio o ligante mais duro, o B10/20, foi o que apresentou uma maior susceptibilidade à perda de massa com o envelhecimento do ligante, enquanto o B35/50 é o que apresenta uma menor perda.

Era esperado que o aditivo contribuisse para um aumento do tempo de vida útil do pavimento, ou seja, garantisse a conservação das propriedades do ligante durante um maior tempo em comparação com o ligante sem aditivo. Esta propriedade evidencia-se a nível da penetração principalmente nas amostras do B35/50 (figura 4.26). O betume base apresenta uma diferença de 22dmm na penetração enquanto as amostras com aditivo apresentam uma diferença de 15dmm.

Verifica-se que as amostras de B35/50 que apresentaram maiores diferenças antes do ensaio de RTFOT foram as que demonstraram uma maior resistência ao envelhecimento, verificando-se o inverso para as amostras B10/20.

Nos ensaios de viscosidade executados obtiveram-se valores ligeiramente superiores aos registados com os ligantes base, implicando em temperaturas de mistura e compactação ligeiramente superiores, sendo essa diferença mais evidente no betume base 35/50. Contudo as diferenças não são muito significativas.

Um estudo recente com o Cecabase[®] RT (Léon, Juan. et. al. 2009), apresentado nas jornadas de 2009 da ASEFMA (associação de empresas dedicadas à produção e aplicação de misturas betuminosas na pavimentação rodoviária), obteve valores iguais em comparação com os betumes base, nos ensaios de penetração e da temperatura de amolecimento. A viscosidade do betume com 0,3% e 0,5% (percentagem não caracterizada neste trabalho) coincidiam com a linha de viscosidade do betume base.

O Cecabase[®] utilizado foi fornecido pela entidade produtora, no entanto salienta-se o facto de que a amostra não se encontrava devidamente identificada, não permitindo a determinação do subtipo de aditivo produzido pela mesma, levantando a hipótese de a amostra pertencer a um produto em fase experimental. Apesar desta incerteza, os dados foram comparados com o aditivo comercial, o Cecabase[®] RT 945.

Dwight Walker, descreveu o Rediset[™] como um aditivo que funciona apenas como um agente tensioactivo, não alterando as propriedades do ligante, nomeadamente a penetração (Asphalt Institute 2009).

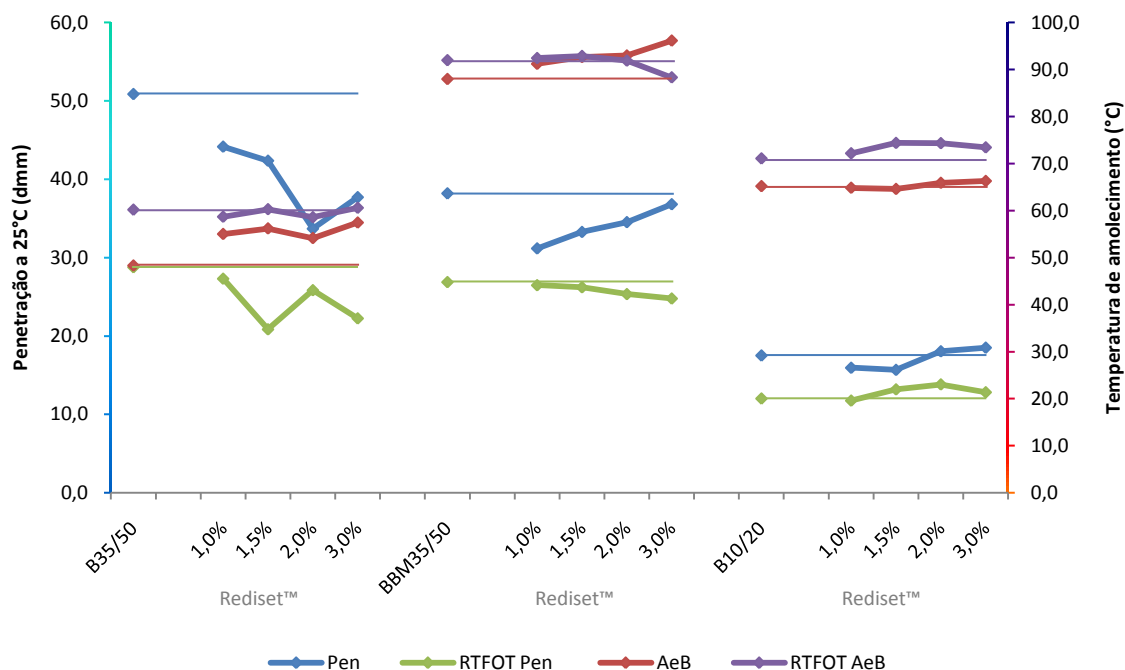


Figura 4.28 - Resultados da penetração e da temperatura de amolecimento

Os ligantes ‘modificados’ com Rediset™ WMX-8017 apresentaram resultados idênticos aos “modificados” com Cecabase. Também neste caso se verificam as maiores diferenças no B35/50.

Dentro deste ligante, a maior diferença surge nos 2,0% de Rediset™ (figura 4.28), em que existe uma diminuição da penetração de cerca 30%, enquanto a temperatura de amolecimento não apresenta uma diferença tão elevada, quando comparado com as restantes amostras. Ou seja, devido a este resultado se encontrar fora da média, pressupõe-se algum erro cometido durante a realização do ensaio.

É de se salientar que a amostra com maior tempo de agitação e por consequência com maior tempo de contacto com o ar, à temperatura de 175°C, foi o B35/50 com 1,0% de Rediset™ e foi a que apresentou resultados mais próximos dos resultados do ligante base.

Para as amostras do BBM35/50, verifica-se um aumento da penetração com o aumento do aditivo presente no ligante, aproximando-se do resultado obtido no ligante sem aditivo. A temperatura de amolecimento não confirma a tendência verificada no ensaio de penetração, a amostra do BBM com 1,0% deveria, supostamente, apresentar uma temperatura de amolecimento superior à amostra com 3,0%.

Entre os três ligantes, o ligante mais duro, o B10/20, foi o que apresentou menor susceptibilidade à modificação com o aditivo, os valores dos ensaios andam muito próximos dos do betume base.

A figura 4.29 traduz os resultados da variação de massa dos ligantes com Rediset™. Como se pode verificar, o BBM35/50 é o ligante que apresenta uma menor variação em comparação com o ligante sem aditivo, já as amostras do B10/20 revelam uma maior susceptibilidade à perda de massa. No entanto, os resultados da penetração e da temperatura de amolecimento apresentam valores próximos dos do betume base. O B35/50 aditivado sofre uma menor perda de massa nas duas percentagens iniciais, estabilizando perto dos valores obtidos no betume base nas restantes percentagens. Contudo, os ensaios de penetração e temperatura de amolecimento após o envelhecimento forçado, apresentaram diferenças significativas quando comparados com o betume base.

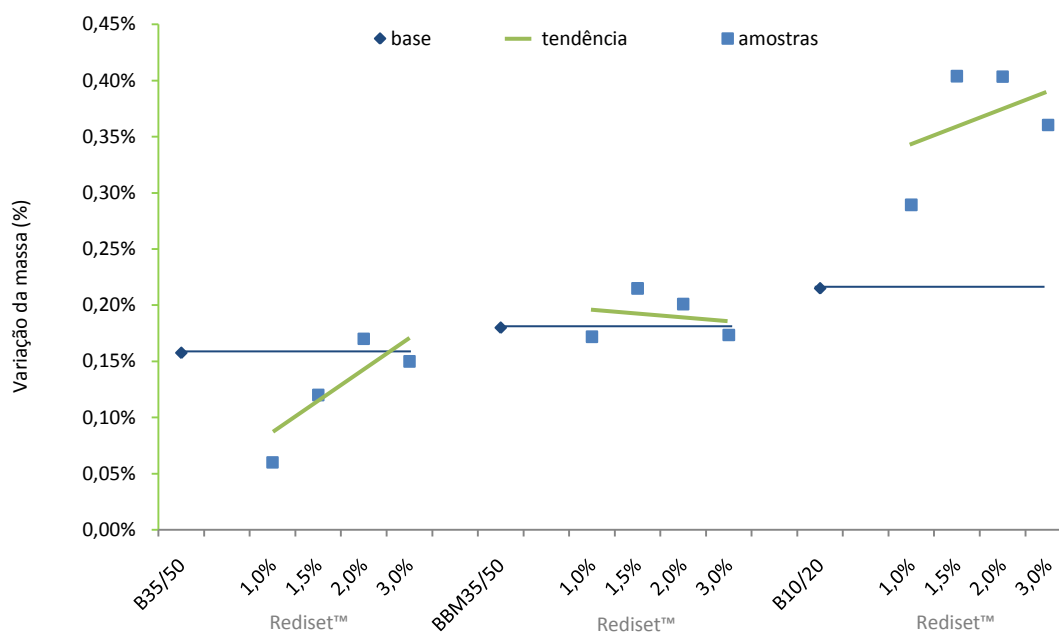


Figura 4.29 - Variação da massa dos ligantes após RTFOT

De acordo com a análise efectuada à figura 4.28, as amostras do B35/50 com 2,0% e 3,0% e as amostras do BBM35/50 com 1,0 e 1,5%, foram as que demonstram uma menor

susceptibilidade ao envelhecimento, apresentando diferenças de penetração inferiores aos betumes “base”.

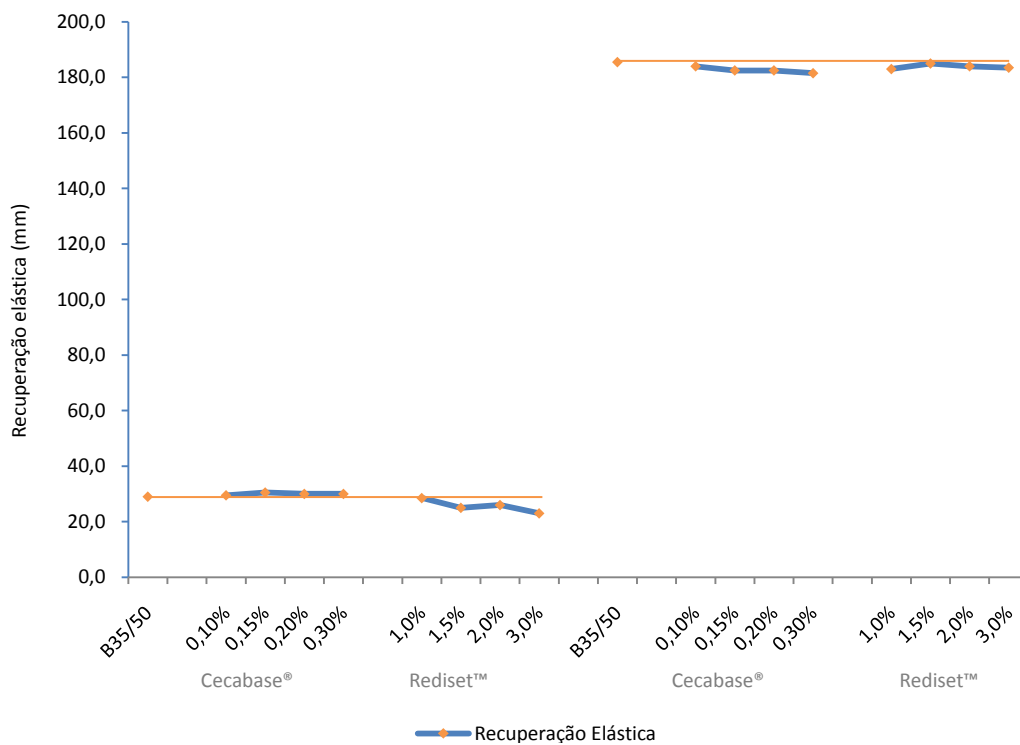


Figura 4.30 – Valores da recuperação elástica dos ligantes

Numa análise comparativa dos resultados da recuperação elástica dos ligantes com e sem aditivo (figura 4.30), verifica-se que a nível das propriedades elásticas dos ligantes não sofrem grandes diferenças.

Capítulo 5

ESTUDO: MISTURA BETUMINOSA COM REDISET™

5. ESTUDO: MISTURA BETUMINOSA COM REDISET™

5.1. Introdução

Neste capítulo, o objectivo foi a caracterização e análise do comportamento de uma mistura betuminosa de alto módulo com betume aditivado com Rediset™. Para tal, foram definidas três percentagens e três temperaturas de produção e compactação. O trabalho experimental foi dividido entre o laboratório da Probigalp S.A. e o laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

No subcapítulo 5.2 caracterizam-se os materiais utilizados na produção da mistura betuminosa, apresentam-se os procedimentos utilizados na execução dos ensaios e os resultados obtidos, comparando-os com os limites do caderno de encargos das Estradas de Portugal.

No subcapítulo 5.3 apresenta-se o fuso granulométrico da mistura betuminosa de alto módulo obtido a partir da combinação dos diferentes agregados disponíveis.

Do subcapítulo 5.4 consta a determinação do teor óptimo de betume utilizando dois procedimentos, o método de Marshall e a equação de Duriez.

No subcapítulo 5.5 apresentam-se as análises do comportamento da mistura betuminosa de alto módulo, para diferentes temperaturas de mistura e compactação com diversas percentagens de Rediset™ WMX 8017. Também neste caso se adoptou a metodologia Marshall.

No subcapítulo 5.6 faz-se uma análise geral aos resultados obtidos, discutem-se as maiores diferenças observadas e avalia-se a percentagem de aditivo com melhores resultados.

5.2. Caracterização dos materiais

Os agregados das misturas betuminosas devem possuir determinadas características físicas, químicas, geométricas e mecânicas, de forma a garantir o bom comportamento das misturas. Propriedades estas que condicionam o comportamento das misturas durante a fase de construção e de serviço do pavimento.

Neste trabalho utilizou-se agregado de origem calcária em 3 fracções granulométricas (10/20; 4/10 e 0/6). O fíler utilizado na formulação foi um fíler recuperado, também de calcário.

Os ensaios de caracterização dos agregados foram efectuados de acordo com as normas europeias vigentes, tendo sido determinados os índices de forma, as massas volúmicas, a resistência à fragmentação, a adesividade e a granulometria das partículas. Os pontos seguintes descrevem de uma forma sucinta os ensaios e os resultados obtidos.

A análise granulométrica dos agregados foi realizada de acordo com a norma NP EN 933-2 (IPQ 1999).

Para este estudo usaram-se duas britas (10/20 e 4/10), um pó (0/6) e um fíler, todos de origem calcária. Após efectuadas as análises granulométricas, obtiveram-se as curvas representadas na figura 5.1.

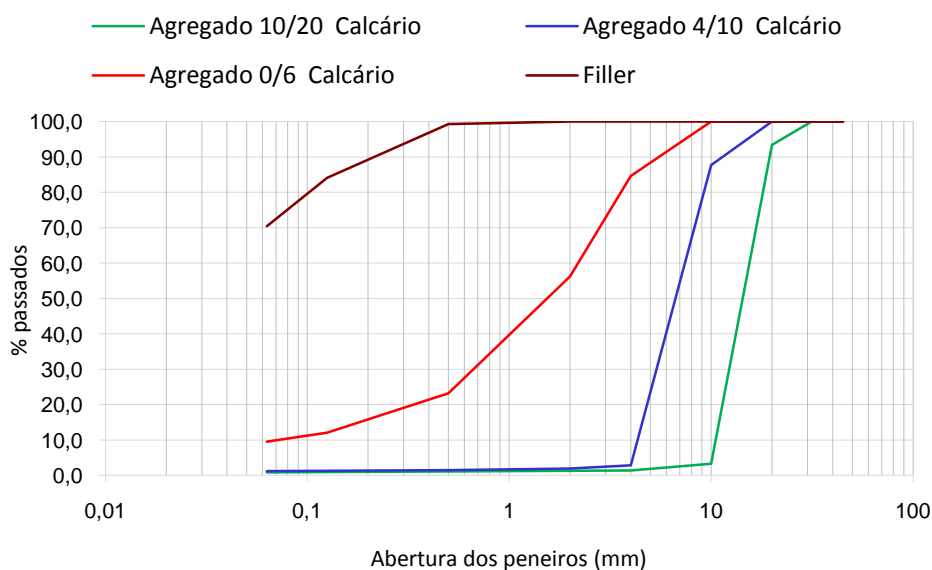


Figura 5.1 – Curvas granulométricas dos agregados analisados

Os índices de achatamento e de forma foram realizados de acordo com as normas portuguesas NP EN 933-3 (IPQ 2002-a) e NP EN 933-4 (IPQ 2002-b). Os ensaios foram executados com os equipamentos da figura 5.2, utilizando-se apenas para as fracções maiores, 10/20 e 4/10. Para a primeira fracção obteve-se um índice de achatamento de 24% e um índice de forma de 10%. Na segunda obteve-se um índice de achatamento de 14% e um índice de forma de 10%.



Figura 5.2 - Peneiros utilizados para o achatamento e o paquímetro para a forma (equipamento do Laboratório da Probigalp)

Os resultados obtidos nos ensaios de massa volúmica e absorção de água – NP EN 1097-6 (IPQ 2003) – nas diferentes fracções granulométricas, encontram-se representados na tabela 5.1. Estes valores são geralmente indicativos das porosidades dos agregados e da sua tendência para a absorção de betume.

Tabela 5.1 - Massas volúmicas dos agregados

Massa volúmica		Fracções			
		10/20	4/10	0/6	
Material impermeável das partículas	ρ_a	2,72	2,72	2,59	g/cm ³
Partículas secas em estufa	ρ_{rd}	2,65	2,63	2,51	g/cm ³
Partículas saturadas com superfície seca	ρ_{ssd}	2,68	2,66	2,54	g/cm ³
Absorção de água	W_{A24}	1,00	1,30	1,20	%

O ensaio de Los Angeles – NP EN 1097-2 (IPQ 2002-e) – é um ensaio de resistência à fragmentação (choque e abrasão) que consiste na inserção de uma determinada quantidade de material num tambor cilíndrico com esferas metálicas durante um determinado número de rotações e na determinação da percentagem ponderal de material desgastado nesse processo. Para o material testado obteve-se um coeficiente de desgaste de 31% ao fim de 500 voltas.

O excesso de finos, a presença de matéria orgânica e/ou a presença de materiais argilosos, são alguns dos factores que podem reduzir o atrito ou dificultar a adesividade agregado/ligante. De modo a verificar a limpeza dos agregados utilizou-se o ensaio de equivalente de areia, descrito na norma NP EN 933-8 (IPQ 2002-c) e o ensaio de azul metileno, descrito na norma NP EN 933-9 (IPQ 2002-d).

No Equivalente de Areia, a fracção analisada, 0/6 mm, apresentou um resultado de 68%. Para o ensaio do valor de azul metileno obteve-se o valor de 0,5 g/kg.

Verifica-se que os agregados cumprem os limites definidos no CEEP para as misturas betuminosas de alto módulo (tabela 5.2). Na produção das misturas utilizou-se o betume 10/20 caracterizado no ponto 4.2.2.

Tabela 5.2 - Características dos agregados

Fracção	Forma (%)	Achatamento (%)	Absorção de água (%)	Los Angeles (%)	Equivalente de areia (%)	Azul de metileno (g/kg)
10/20	10	24	1,0	31	-	-
4/10	10	14	1,3	-	-	-
0/6	-	-	1,2	-	68	0,5
Limites para MBAM (0/20)	Máximo 30	Máximo 30	Máximo 2	Máximo 35	Mínimo 50	Máximo 2

5.3. Mistura betuminosa de alto módulo

Neste caso de estudo foi utilizada uma mistura betuminosa de alto módulo (MBAM), tipo de mistura correntemente usado em camadas estruturais e de regularização. A mistura de agregados foi obtida através da combinação das curvas granulométricas individuais dos agregados componente, conforme explicado no ponto 5.2, obtendo-se uma curva constituída por 23% de brita calcária da fracção 10/20, 19% de brita calcária da fracção 4/10, 56% de pó de pedra, também calcário (fracção 0/6) e 2% de fíler recuperado (tabela 5.3). A figura 5.3 apresenta a curva granulométrica da MBAM formulada e o seu enquadramento nas exigências do CEEP.

Tabela 5.3 – Resultados da análise granulométrica

Diâmetro # (mm)	Percentagem de agregado passado						
	Fracção 10/20	Fracção 4/10	Fracção 0/6	Fíler	Fuso obtido	Limite inferior	Limite superior
40	100	100	100	100	100	100	100
31,5	100	100	100	100	100	100	100
20	93	100	100	100	98,5	90	100
10	3	88	100	100	75,4	63	81
4	1	3	85	100	50,3	42	57
2	1	2	56	100	34,2	27	41
0,5	1	2	23	99	15,6	11	23
0,125	1	1	12	84	8,9	7	13
0,063	0,9	1,2	9,6	70,4	7,2	5	9
Percentagem material usado	23	19	56	2			

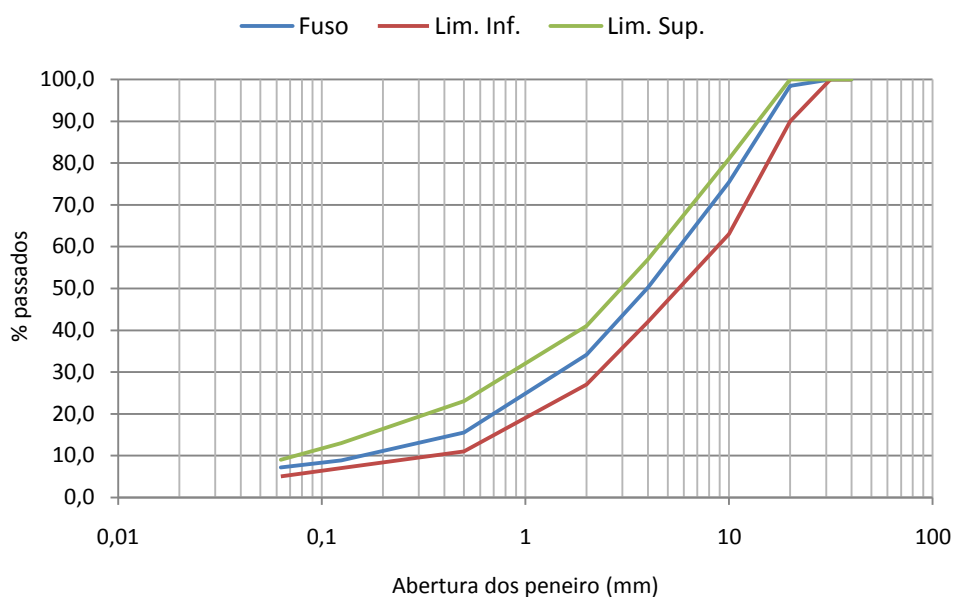


Figura 5.3 - Curva granulométrica da mistura e os limites para MBAM

Na produção das misturas utilizou-se o betume 10/20 caracterizado no ponto 4.2.2.

5.4. Determinação da percentagem óptima de betume

As misturas betuminosas devem apresentar uma boa resposta mecânica às solicitações impostas e garantirem segurança e conforto aos utentes. A estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade, são algumas das características exigidas às misturas betuminosas (Picado-Santos et al. 2006).

As misturas betuminosas podem ser formuladas segundo vários métodos: especificações; empíricos; analíticos; volumétricos; ou racionais. A escolha do método adequado na formulação das misturas betuminosas deve ter em consideração o tipo de obra, a experiência do projectista e os equipamentos de ensaios.

Neste trabalho utilizou-se um método empírico (método de Marshall) na formulação da mistura e um método analítico expedito para aproximação ao teor óptimo de betume. (equação de Duriez).

5.4.1. Método de Marshall

Os métodos empíricos, onde o método Marshall se inclui, são métodos que utilizam parâmetros como a baridade, a porosidade, estabilidade e a deformação, na formulação das misturas betuminosas. Este método, descrito na norma EN 12697-34 (Cen 2004-b), aplica-se na formulação de misturas betuminosas densas com agregado de dimensões inferiores ou iguais a 25mm.

Para a determinação da percentagem óptima de betume, foram realizados três provetes para cada percentagem de ligante (4,5; 5,0; 5,5; 6,0 e 6,5%), completando um total de quinze provetes.

Recorrendo-se aos resultados dos ensaios de viscosidade do ligante B10/20 (apresentados no subcapítulo 4.7), efectuou-se a mistura dos agregados com o ligante a uma temperatura de 171°C e a compactação a uma temperatura de 161°C.



Figura 5.4 - Preparação e equipamento de compactação das misturas (equipamento do Laboratório da Probialp)

A preparação dos provetes foi feita de acordo com a norma EN 12697-30 (Cen 2004-a), a compactação dos provetes foi feita por compactador de impacto (figura 5.4) através da aplicação de 75 pancadas em cada face dos provetes. Depois de efectuada a desmoldagem verificou-se as medidas dos provetes (figura 5.6) de acordo com a norma EN 12697-29 (Cen 2002-b), obtendo-se os resultados tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Medições dos provetes

% de betume	Série de provetes	Nº do provete	Temperatura de mistura e compactação (°C)	Média de 4 espessuras do provete (mm)	Média de 6 diâmetros do provete (mm)	Média de espessura da série (mm)	Médias do diâmetro da série (mm)
4,5	Série 1	1	171 e 161°C	63,30	101,72	62,84	101,75
		2		62,66	101,83		
		3		62,56	101,70		
5	Série 2	4	171 e 161°C	61,87	101,79	62,29	101,73
		5		62,23	101,74		
		6		62,77	101,65		
5,5	Série 3	7	171 e 161°C	61,98	101,75	61,85	101,78
		8		62,06	101,77		
		9		61,51	101,82		
6	Série 4	10	171 e 161°C	61,16	101,72	61,00	101,74
		11		60,78	101,74		
		12		61,05	101,76		
6,5	Série 5	13	171 e 161°C	61,39	101,77	61,53	101,77
		14		61,84	101,78		
		15		61,38	101,76		

Com vista a uma fácil interpretação da evolução das dimensões com as diferentes percentagens de ligante apresentam-se estas graficamente (figura 5.5).

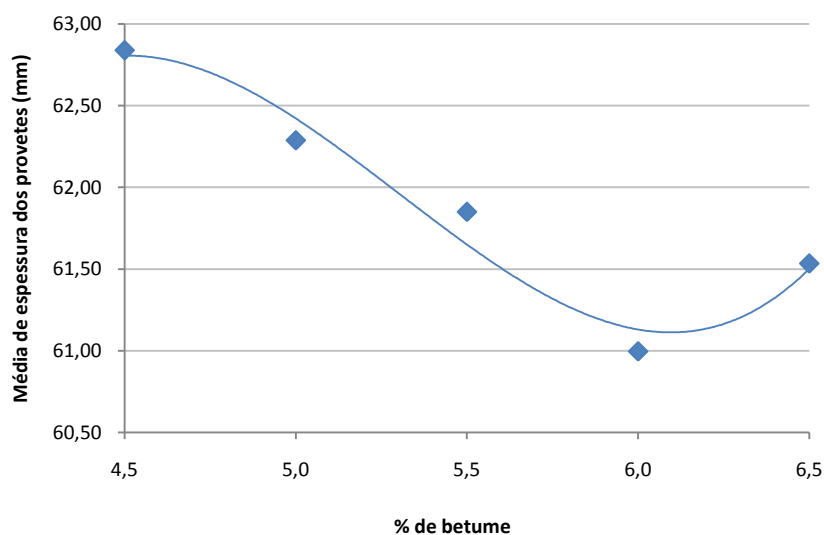


Figura 5.5 - Variação das espessuras dos provetes



Figura 5.6 – Aspecto dos provetes

As baridades dos provetes foram determinadas através da pesagem sucessiva dos provetes secos, imersos e com as superfícies secas (no ar). Antes de se efectuar a pesagem dos provetes imersos, estes foram mantidos dentro de água durante 60 minutos, a norma EN 12697-6 (Cen 2003-a) estipula um período mínimo de 30 minutos para a água poder percolar dentro dos provetes.

Foram, também, determinadas as baridades máximas teóricas (BMT) para cada uma das percentagens de ligante. Para a realização deste ensaio utilizou-se o procedimento volumétrico (procedimento A) descrito na norma EN 12697-5 (Cen,2002-a), a figura 5.7 ilustra os equipamentos utilizados para este procedimento.. A baridade máxima foi determinada de acordo com a equação (5.1).

$$BMT = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times v_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w}} \quad (5.1)$$

Sendo:

BMT – Baridade máxima teórica

m_1 – Massa do picnómetro + tampa (g)

m_2 – Massa do picnómetro + tampa + amostra (g)

m_3 – Massa do picnómetro + tampa + amostra + água (g)

ρ_w – Massa volúmica do líquido à temperatura de ensaio (kg/m³)

V_p – Volume do picnómetro (m³)



Figura 5.7 - Vista geral dos equipamentos utilizados na determinação das baridades máximas teóricas (Laboratório da Probigalp)

Os ensaios de compressão Marshall para obtenção da carga máxima de rotura e deformação, foram realizados de acordo com a norma EN 12697-34 (Cen 2004-b).

Como se disse foram produzidas séries de 3 provetes para cada percentagem de ligante em estudo e com base nos resultados obtidos, calcularam-se os valores médios das baridades, da estabilidade, da deformação, dos vazios na mistura de agregados e da porosidade. Os resultados obtidos encontram-se representados graficamente na figura 5.8.

Na tabela 5.5 apresentam-se os parâmetros especificados pelo CEEP para uma mistura betuminosa de alto módulo. Parâmetros tidos como referência neste trabalho.

Tabela 5.5 – Limites das propriedades de uma MBAM

Propriedades		AC 20 BASE (MBAM)
Características de Marshall EN 12697-34	Estabilidade mínima	16kN
	Deformabilidade máxima	4,00mm
	Deformabilidade mínima	2,00mm
Vazios na mistura de agregados (VMA), mínimo EN 12697-8		14%
Porosidade (Vm), máximo e mínimo EN12697-8		6 a 2%
Percentagem mínima de ligante		4,0%

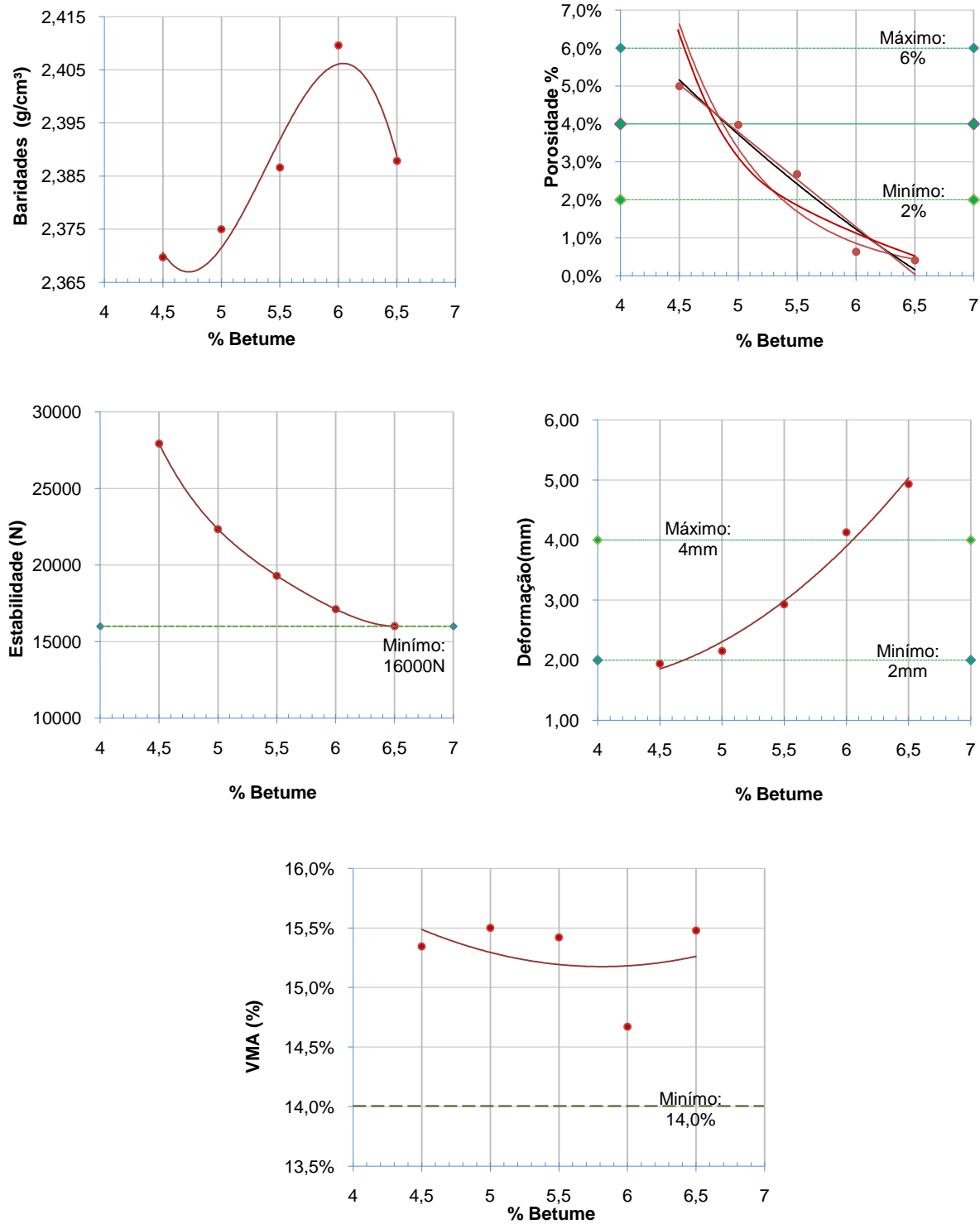


Figura 5.8 - Influência da variação do ligante nas propriedades das misturas

Como se depreende dos gráficos acima apresentados, verifica-se que para percentagens superiores a 5,7 a porosidade é inferior ao limite mínimo (2%) e que a deformação para valores superiores 5,9% de ligante é superior ao máximo especificado (4mm).

A análise dos resultados apresentados permite determinar, de acordo com a metodologia Marshall, uma percentagem óptima de betume na mistura de 5,2.

Para este valor verifica-se que todos os parâmetros se encontram dentro dos limites estipulados.

5.4.2. Equação de Duriez

A equação de Duriez (equação 5.2) permite determinar o teor óptimo de betume de modo expedito, utilizando critérios como o módulo de riqueza, a superfície específica dos agregados, a massa volúmica da mistura e um coeficiente de correcção função da massa volúmica da mistura de agregados.

$$P_b = \alpha \times K \times \sqrt[5]{\Sigma} \quad (5.2)$$

Sendo:

P_b - Teor em betume, em percentagem

K - módulo de riqueza em betume (deve estar compreendido entre 3,3 e 3,8)

$\alpha = \frac{2,65}{\rho_G}$ - ρ_G corresponde à massa volúmica da mistura de agregados, em g/cm³

Σ - Superfície específica dos agregados (equação 5.3), em m²/kg

$$\Sigma = \frac{(0,25G + 2,3S + 12s + 150f)}{100} \quad (5.3)$$

Sendo:

G – Proporção ponderal dos elementos superiores a 6,3mm;

S – Proporção ponderal dos elementos compreendidos entre 6,3 e 0,250mm;

s – Proporção ponderal dos elementos compreendidos entre 0,250 e 0,063mm;

f – Proporção ponderal dos elementos inferiores a 0,063mm.

A mistura betuminosa em análise corresponde a uma MBAM, pelo que se adoptou para o módulo de riqueza (K) o valor de 3,3. Obtendo-se um teor em betume de 5,5% o que corresponde a 5,2% de betume na mistura

5.5. Análise do comportamento da mistura com Rediset™ WMX

Como referido na introdução, este capítulo analisa, através do método de Marshall, o comportamento de uma mistura betuminosa de alto módulo com diversas percentagens de Rediset™ WMX 8017. Com este estudo pretende-se, também, determinar a evolução do comportamento das misturas, quando produzidas e compactadas a diferentes temperaturas. Foram efectuadas séries de três provetes para cada percentagem de aditivo testada (1,0; 1,5 e 2,0%), e variaram-se as temperaturas de mistura e compactação, como exemplificado na figura 5.9.

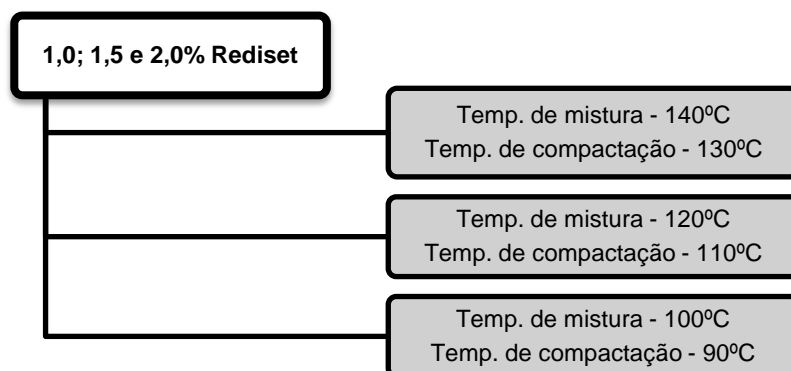


Figura 5.9 – Temperaturas de mistura e compactação utilizadas

A temperatura de mistura foi aplicada através de uma manta de aquecimento regulável (figura 5.10), garantindo-se assim o controlo da temperatura pretendida. Os agregados foram aquecidos durante aproximadamente duas horas, a uma temperatura inferior em 10°C à temperatura de mistura, enquanto que a temperatura de aquecimento do ligante foi obtida a partir dos resultados dos ensaios de viscosidade (171°C).



Figura 5.10 – Misturadora com manta de aquecimento utilizada (Laboratório do departamento de Engenharia Civil da Universidade Aveiro – foto do autor)

Os provetes foram compactados com recurso a um compactador de impacto, sob o mesmo procedimento aplicado na confecção dos provetes sem aditivo (subcapítulo 5.4.1).

Para cada percentagem de aditivo foram efectuados 9 provetes, perfazendo um total de 27 provetes para a realização deste trabalho.

Foram verificadas as dimensões de todos os provetes de acordo com a norma EN 12697-29 (Cen 2002-b). As espessuras dos provetes correspondem a uma média entre 4 valores obtidos e os diâmetros correspondem a uma média de 6 valores, 3 diâmetros em cada face. A tabela 5.6 e a figura 5.11 ilustram os resultados obtidos nas medições.

Tabela 5.6 - Dimensões dos provetes com Rediset™ WMX

% de Rediset	Série de provetes	Nº provete	Temperatura mistura e compactação (°C)	Média de 4 espessuras do provete (mm)	Média de 6 diâmetros do provete (mm)	Média de espessura da série (mm)	Médias do diâmetro da série (mm)
1,00%	Série 1	1	140 e 130°C	60,49	102,00	60,92	101,97
		2		61,16	101,90		
		3		61,10	102,00		
	Série 2	4	120 e 110°C	63,33	102,00	62,90	102,02
		5		62,56	102,05		
		6		62,80	102,00		
	Série 3	7	100 e 90°C	63,54	101,95	63,61	101,95
		8		63,90	102,00		
		9		63,39	101,90		
1,50%	Série 4	10	140 e 130°C	61,91	101,95	61,66	101,98
		11		60,44	102,00		
		12		61,40	102,00		
	Série 5	13	120 e 110°C	64,26	101,95	63,85	101,92
		14		63,86	101,90		
		15		63,44	101,90		
	Série 6	16	100 e 90°C	64,70	101,90	64,54	101,90
		17		64,66	101,90		
		18		64,26	101,90		
2,00%	Série 7	19	140 e 130°C	61,40	102,00	61,68	102,00
		20		61,58	102,00		
		21		62,05	102,00		
	Série 8	22	120 e 110°C	62,40	102,00	62,36	101,95
		23		61,90	101,95		
		24		62,78	101,90		
	Série 9	25	100 e 90°C	63,43	102,00	63,39	101,98
		26		63,36	101,95		
		27		65,15	101,95		

Como se pode verificar na figura 5.11, com 1,0% de aditivo é possível obter-se uma redução de 30°C na temperatura de mistura e compactação e uma diminuição da espessura dos provetes, o que faz supor uma clara melhoria no processo de compactação.

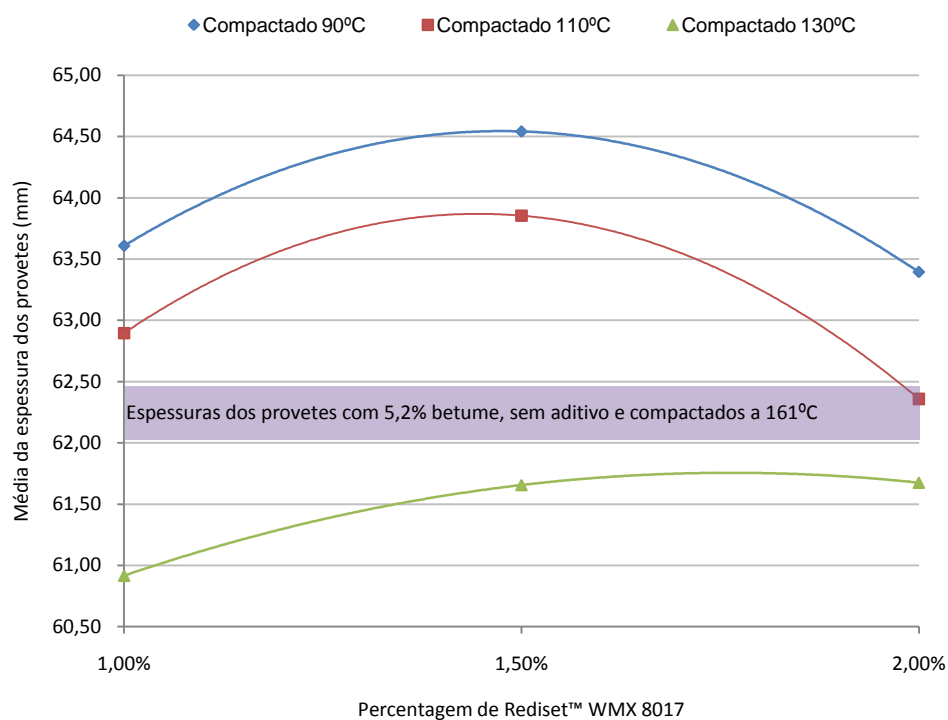


Figura 5.11 - Variação média de espessuras das séries de provetes

Quanto às baridades dos provetes, a figura 5.12 ilustra a variação das baridades obtidas para as diferentes temperaturas e percentagens de aditivo em estudo. A tabela 5.7 apresenta as massas obtidas nas pesagens dos provetes e as respectivas baridades.

Tabela 5.7 – Propriedades dos provetes com Rediset™ WMX

% de Rediset	Série de provetes	Nº do provete	Temperatura mistura e compactação (°C)	Temperatura da água (°C)	Densidade da água (pw)	Massa do provete (g)			Baridade (kg/m³)	Média de baridades (g/cm³)
						Seco	Imerso	Com a superfície seca		
1,00%	Série 1	1	140 e 130°C	21,0	998,1	1161,9	683,3	1166,3	2401,0	2,407
		2				1182,8	698,4	1185,7	2422,6	
		3				1194,1	702,9	1200,3	2396,1	
	Série 2	4	120 e 110°C	21,0	998,1	1200,3	699,8	1204,3	2374,7	2,375
		5				1189,5	694,7	1194,8	2374,0	
		6				1199,2	700,6	1204,4	2375,8	
	Série 3	7	100 e 90°C	21,0	998,1	1190,4	695,4	1195,3	2376,8	2,375
		8				1195,0	696,9	1199,3	2374,1	
		9				1200,9	701,1	1205,8	2374,9	
1,50%	Série 4	10	140 e 130°C	21,0	998,1	1200,5	710,0	1209,4	2399,3	2,404
		11				1194,2	707,6	1195,8	2441,5	
		12				1200,4	706,8	1204,4	2407,8	
	Série 5	13	120 e 110°C	21,0	998,1	1191,8	696,7	1195,7	2383,8	2,370
		14				1198,2	695,7	1203,5	2355,1	
		15				1189,8	695,2	1195,8	2372,2	
	Série 6	16	100 e 90°C	21,0	998,1	1192,6	689,9	1199,4	2336,3	2,338
		17				1197,5	691,7	1205,9	2324,4	
		18				1181,1	687,0	1188,0	2353,0	
2,00%	Série 7	19	140 e 130°C	21,0	998,1	1186,5	696,0	1189,5	2399,7	2,394
		20				1194,7	701,7	1197,2	2406,5	
		21				1179,9	688,7	1184,4	2375,7	
	Série 8	22	120 e 110°C	21,0	998,1	1198,6	700,7	1202,8	2382,6	2,387
		23				1190,7	696,7	1193,4	2392,7	
		24				1201,1	701,8	1204,6	2384,3	
	Série 9	25	100 e 90°C	21,0	998,1	1194,0	693,8	1198,8	2359,9	2,361
		26				1195,6	695,7	1200,7	2363,0	
		27				1195,0	687,2	1203,5	2310,1	

Da figura 5.12 pode retirar-se que as baridades obtidas nas diferentes percentagens de aditivo compactadas a 110°C, situam-se muito próxima da baridade da mistura sem aditivo. Enquanto que as baridades dos provetes compactados a 130°C são superiores às dos provetes compactados a 160°C, o que concorda com os resultados obtidos nas espessuras dos provetes.

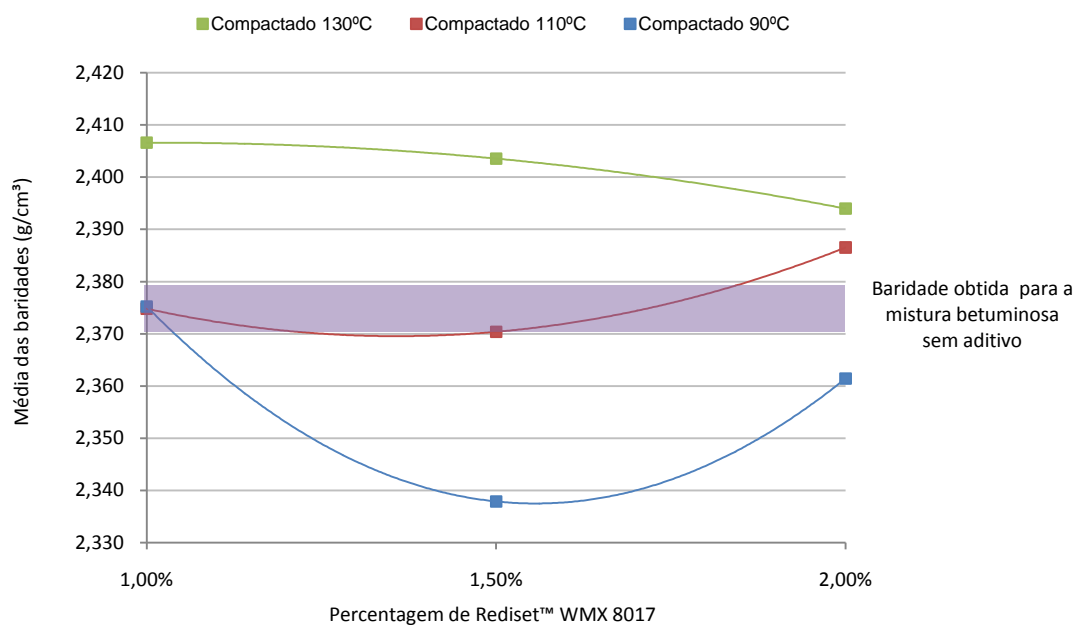


Figura 5.12 – Variação média das baridades

Determinadas as baridades dos provetes, efectuou-se o ensaio de compressão Marshall, de acordo com a norma já anteriormente referida. A tabela 5.8 apresenta os resultados obtidos em cada provete e as médias para cada série.

Tabela 5.8 – Cargas e deformações obtidas no ensaio de Marshall

% de Rediset	Série de provetes	Nº de provete	Temperatura de mistura e compactação (°C)	Carga de rotura (kN)	Deformação (mm)	Média das cargas de rotura (kN)	Média das deformações (mm)
1,00%	Série 1	1	140 e 130°C	27,02	4,30	27,33	4,43
		2		27,94	5,00		
		3		27,02	4,00		
	Série 2	4	120 e 110°C	14,99	3,90	14,38	3,67
		5		14,07	3,00		
		6		14,07	4,10		
	Série 3	7	100 e 90°C	14,99	3,90	12,84	3,33
		8		9,45	3,10		
		9		14,07	3,00		
1,50%	Série 4	10	140 e 130°C	23,32	4,00	21,16	4,07
		11		22,86	4,20		
		12		17,31	4,00		
	Série 5	13	120 e 110°C	14,07	2,90	14,38	3,40
		14		14,99	3,30		
		15		14,07	4,00		
	Série 6	16	100 e 90°C	10,37	3,00	11,76	3,03
		17		11,29	3,00		
		18		13,61	3,10		
2,00%	Série 7	19	140 e 130°C	15,92	4,00	16,08	3,00
		20		17,77	3,00		
		21		14,53	2,00		
	Série 8	22	120 e 110°C	14,99	3,30	15,15	3,43
		23		14,07	3,00		
		24		16,38	4,00		
	Série 9	25	100 e 90°C	14,54	4,00	14,38	3,37
		26		14,07	3,10		
		27		14,54	3,00		

A figura 5.13 e figura 5.14 demonstram graficamente o comportamento da deformação e da carga de rotura para as diferentes temperaturas analisadas e para a diferentes percentagens de aditivo.

Os resultados evidenciam deformações superiores aos limites estipulados pelo CEEP (deformações entre 2 e 4mm) nas percentagens de 1 e 1,5 de aditivo compactadas a 130°C. Todas as restantes combinações aditivo/temperatura produzem resultados dentro do estipulado pelo CEEP para MBQ.

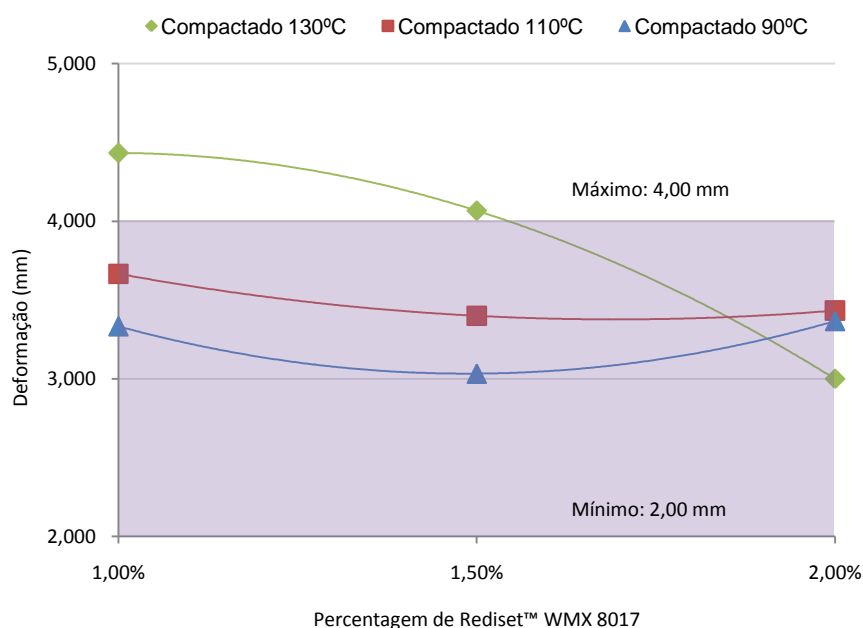


Figura 5.13 – Média das deformações obtidas para cada série

Os valores das cargas de rotura encontrados mostram que apenas as misturas compactadas a 130°C cumprem o limite mínimo imposto pelo CEEP para as MBQ, ou seja, cargas de rotura superiores a 16kN. No entanto os valores obtidos para as misturas a 110°C ficam muito próximos dos mínimos admissíveis.

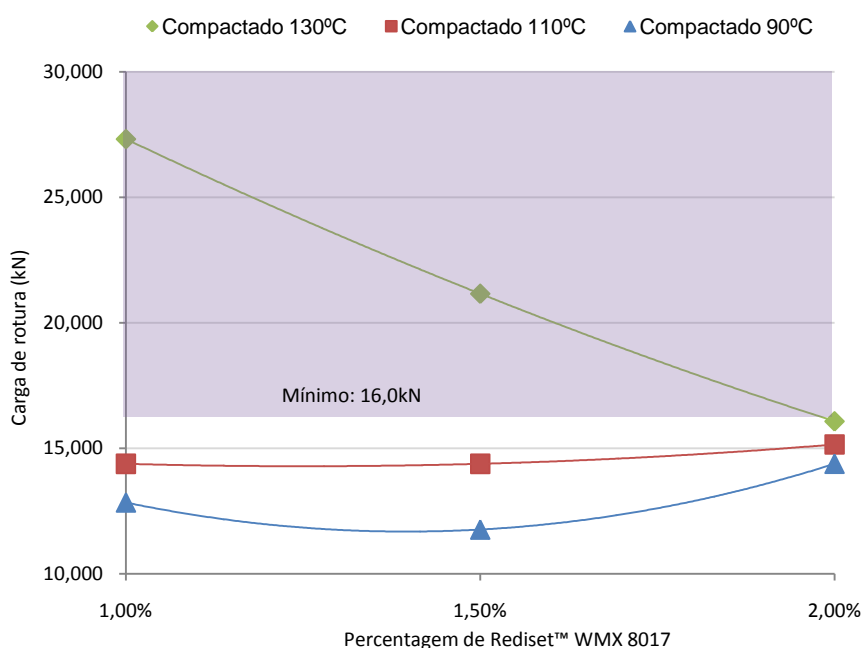


Figura 5.14 - Média das cargas de rotura obtidas para cada série

5.6. Discussão de resultados

No que concerne aos agregados é importante referir que neste trabalho utilizaram-se agregados de origem calcária (figura 5.15). Este tipo de agregado apresenta uma textura superficial lisa, implicando geralmente um menor imbricamento entre as várias fracções da mistura e, por consequência, uma habitual menor resistência às deformações. Teoricamente, a utilização de um agregado de origem granítica poderá levar à obtenção de melhores resultados, uma vez que estes apresentam uma textura mais rugosa, aumentando geralmente a resistência à deformação.



Figura 5.15 – Agregados de origem calcária utilizados neste trabalho

Um dos objectivos desta investigação foi o de procurar formular uma mistura betuminosa de alto módulo, produzida a temperaturas inferiores às convencionais, obtendo-se pelo menos resultados semelhantes.

Com os métodos utilizados na determinação da percentagem óptima de betume (Marshall e Duriez) registaram-se percentagens semelhantes, o que mostra uma importante possibilidade de simplificação para estudos de muitas variáveis

A figura 5.16 compara a espessura média dos provetes compactados a diferentes temperaturas. A partir do gráfico, observa-se que a mistura com 1,0% de Rediset™

compactada a 130°C apresentou menores espessuras em comparação com as restantes percentagens de aditivo. Ou seja, 1,0% de aditivo é suficiente para se obter uma boa “compactação” com uma redução de 30°C da temperatura de produção e compactação. Para reduções superiores a 30°C é necessário utilizar maiores percentagens de aditivo. Este parâmetro (espessura dos provetes) é importante para compreender a influência do aditivo como agente tensioactivo entre as faces do agregado. A diminuição das espessuras dos provetes é indicadora do aumento das baridades, mas não, necessariamente, do aumento da estabilidade da mistura.

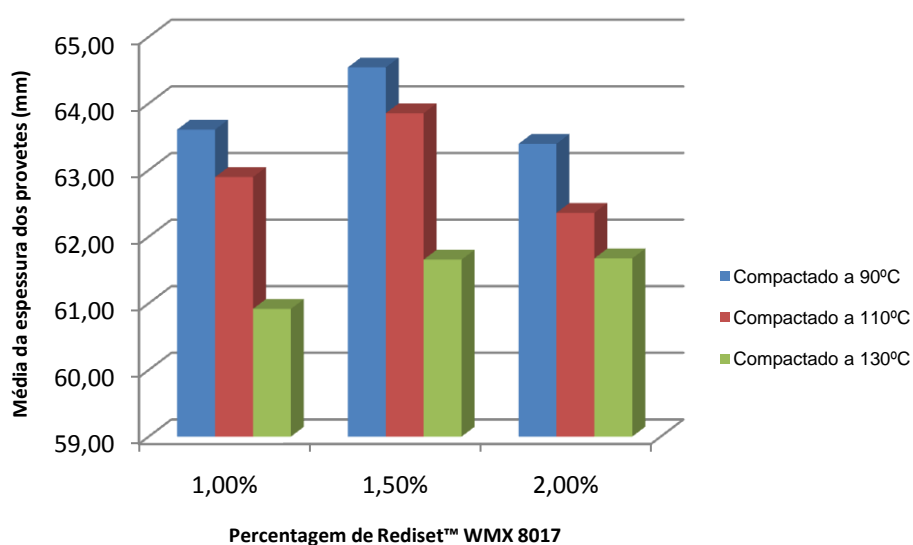


Figura 5.16 - Variação de espessura para cada percentagem de aditivo

No caso das misturas incluindo aditivo foram determinadas baridades hidrostáticas e geométricas (EN 12697-6). Os resultados encontrados pela equação (5.4) encontram-se representados na tabela 5.9. Pode-se verificar que as baridades diminuem com o aumento da temperatura, no entanto as baridades hidrostáticas apresentam valores superiores às baridades geométricas.

$$\rho_{b, \text{dim}} = \frac{m_i}{d^2 \times h \times \frac{\pi}{4}} \times 10^6 \quad (5.4)$$

Sendo:

m_1 – Massa do provete (g)

d – Média dos diâmetros (mm)

h – Média das espessuras (mm)

$\rho_{b,dim}$ – Baridade geométrica dos provetes (kg/m³)

Para a determinação da porosidade das misturas aditivadas (tabela 5.10), foi necessário calcular a baridade máxima teórica através da equação (5.5), retirada da norma EN 12697-5 (Cen, 2002-a), obtendo-se o valor de 2,44 g/cm³.

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n (p_i / \rho_i) + (p_p / \rho_p)} \quad (5.5)$$

Sendo:

P_i – Percentagem de agregado i na mistura (m/m)

ρ_i – Densidade aparente do agregado i (kg/m³)

P_p – Percentagem betume na mistura (m/m)

ρ_p – Densidade do betume (kg/m³)

$$\sum_{i=1}^n (p_i) + p_p = 100 \%$$

Tabela 5.9 – Baridades hidrostáticas e geométricas

% de Rediset	Série de provetes	Nº do provete	Média das espessuras do provete (mm)	Médias dos diâmetros do provete (mm)	Massa (g)	Baridade geométrica (kg/m³)	Séries	
							Média das baridades geométricas (g/cm³)	Média das baridades hidrostáticas (g/cm³)
1,00%	Série 1	1	60,49	102,00	1161,9	2350,8	2,371	2,407
		2	61,16	101,90	1182,8	2371,3		
		3	61,10	102,00	1194,1	2391,7		
	Série 2	4	63,33	102,00	1200,3	2319,6	2,327	2,375
		5	62,56	102,05	1189,5	2324,5		
		6	62,80	102,00	1199,2	2336,9		
	Série 3	7	63,54	101,95	1190,4	2295,1	2,302	2,375
		8	63,90	102,00	1195,0	2288,6		
		9	63,39	101,90	1200,9	2323,1		
1,50%	Série 4	10	61,91	101,95	1200,5	2375,3	2,395	2,404
		11	60,44	102,00	1194,2	2418,1		
		12	61,40	102,00	1200,4	2392,6		
	Série 5	13	64,26	101,95	1191,8	2271,9	2,291	2,370
		14	63,86	101,90	1198,2	2300,6		
		15	63,44	101,90	1189,8	2299,8		
	Série 6	16	64,70	101,90	1192,6	2260,2	2,262	2,338
		17	64,66	101,90	1197,5	2270,8		
		18	64,26	101,90	1181,1	2253,7		
2,00%	Série 7	19	61,40	102,00	1186,5	2364,9	2,355	2,394
		20	61,58	102,00	1194,7	2374,4		
		21	62,05	102,00	1179,9	2327,1		
	Série 8	22	62,40	102,00	1198,6	2350,7	2,351	2,386
		23	61,90	101,95	1190,7	2356,4		
		24	62,78	101,90	1201,1	2346,1		
	Série 9	25	63,43	102,00	1194,0	2303,8	2,287	2,361
		26	63,36	101,95	1195,6	2311,5		
		27	65,15	101,95	1 TM 195,0	2246,9		

Tabela 5.10 - Porosidades e VMA dos provetes

	1,0% Rediset™			1,5% Rediset™			2,0% Rediset™		
	Série 1	Série 2	Série 3	Série 4	Série 5	Série 6	Série 7	Série 8	Série 9
Porosidade (%)	1,5%	2,8%	2,8%	1,7%	3,0%	4,3%	2,0%	2,4%	3,4%
VMA (%)	13,6%	14,8%	14,8%	13,8%	15,0%	16,1%	14,1%	14,4%	15,3%

Como esperado as porosidades dos provetes aumentam com a diminuição da temperatura de mistura e compactação.

Um betume muito viscoso, como o utilizado (B10/20), apresenta maior dificuldade na obtenção de uma boa trabalhabilidade a baixas temperaturas. No entanto, mesmo neste tipo de betume, a adição do Rediset™ permite que os valores das espessuras dos provetes sejam próximas às espessuras médias dos provetes sem aditivo.

De notar que a inclusão de aditivo pode conduzir a uma redução da porosidade da mistura ficando esta fora dos limites das porosidades e VMA considerados no CEEP, como acontece nas séries 1 e 4.

O ensaio de Marshall nos provetes com o aditivo foi efectuado com o equipamento da figura 5.17. Os resultados obtidos na estabilidade dos provetes produzidos a 120 e 100°C, encontram-se abaixo do limite mínimo imposto pelo CEEP, de 16kN. Enquanto as deformações encontram-se dentro dos limites estipulados das MBAM, de 2 a 4mm.



Figura 5.17 – Equipamento do ensaio de Marshall (Laboratório do departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro – foto do autor)

Resumindo, para a mistura com 2,0% de aditivo a temperatura de compactação de 129°C é a única que cumpre os limites do CEEP. Como se pode verificar nos gráficos da figura 5.18, o principal factor que define esta temperatura é a carga de rotura.

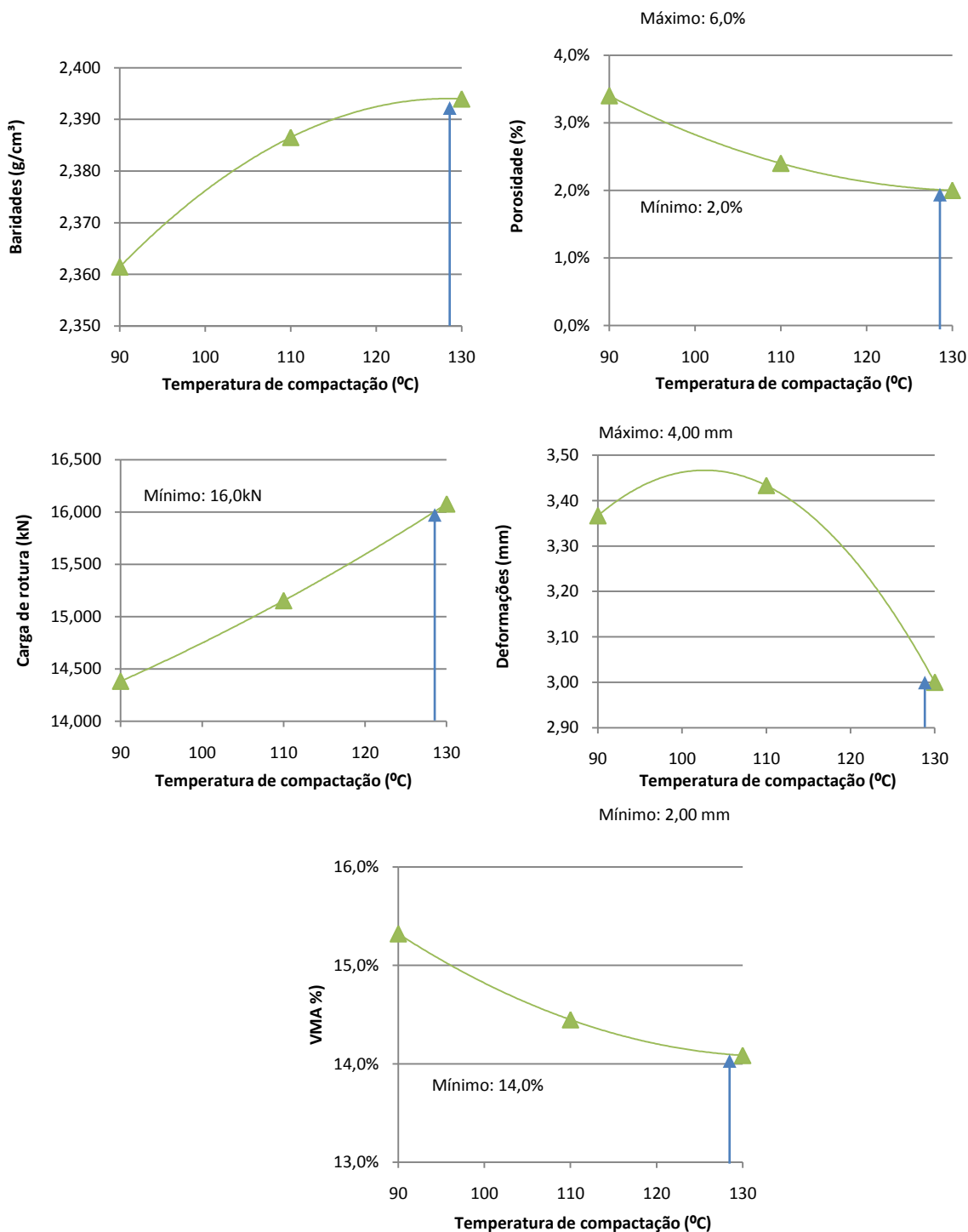


Figura 5.18 – Influência na variação da temperatura para uma MBAM com 2,0% Rediset™

Para as misturas com 1,5% de aditivo obtêm-se uma temperatura mínima para a compactação de aproximadamente 118°C, de forma a cumprir os limites do CEEP. Como se pode verificar nos gráficos da figura 5.19, também neste caso, o principal factor que condiciona a temperatura é a carga de rotura.

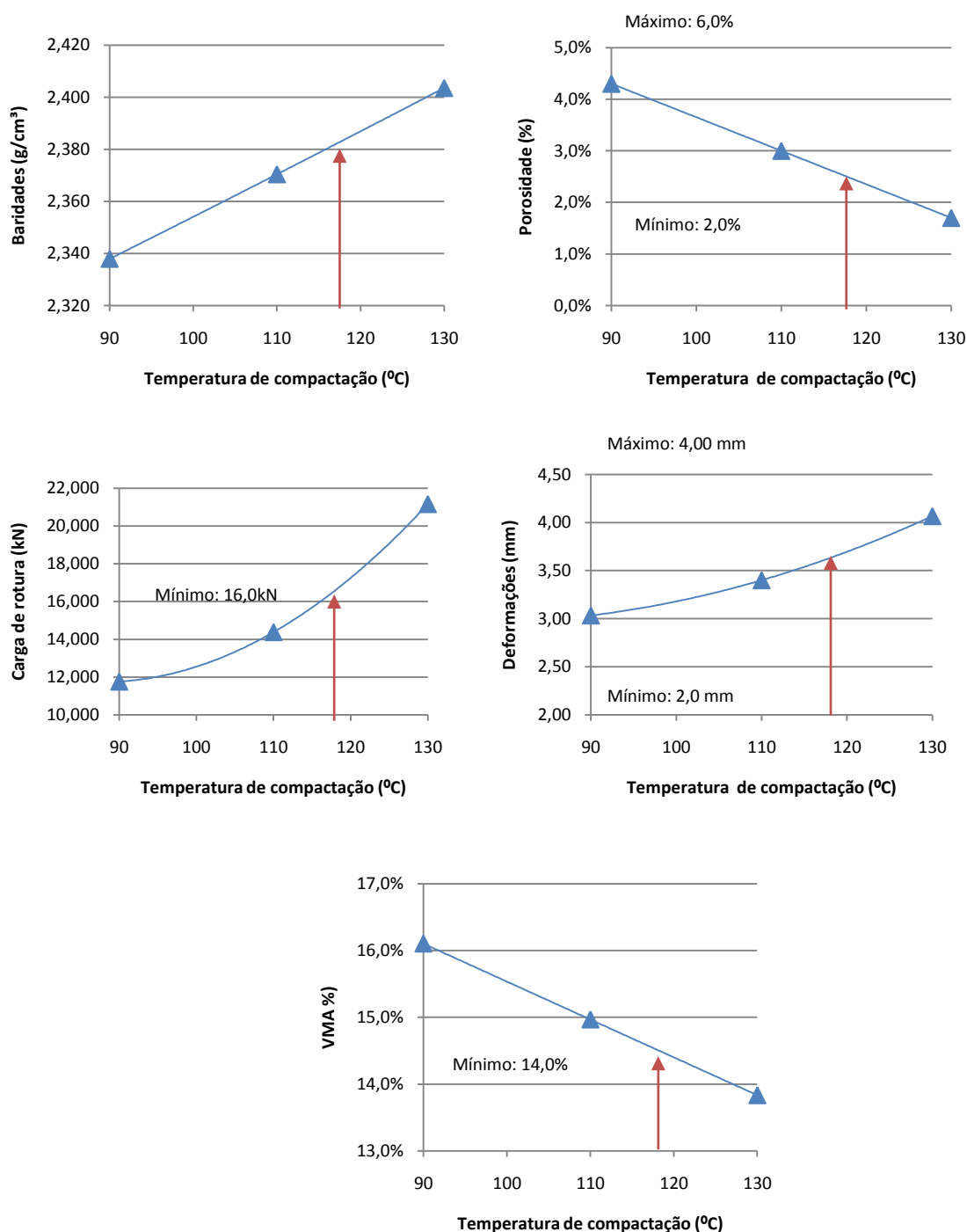


Figura 5.19 – Influência na variação da temperatura para uma MBAM com 1,5% Rediset™

Para a mistura com 1,0% de aditivo obtêm-se uma temperatura de compactação mínima de aproximadamente 114°C, para a qual se cumpre os limites do CEEP. Igualmente (figura 5.20), o principal factor que define esta temperatura é a carga de rotura.

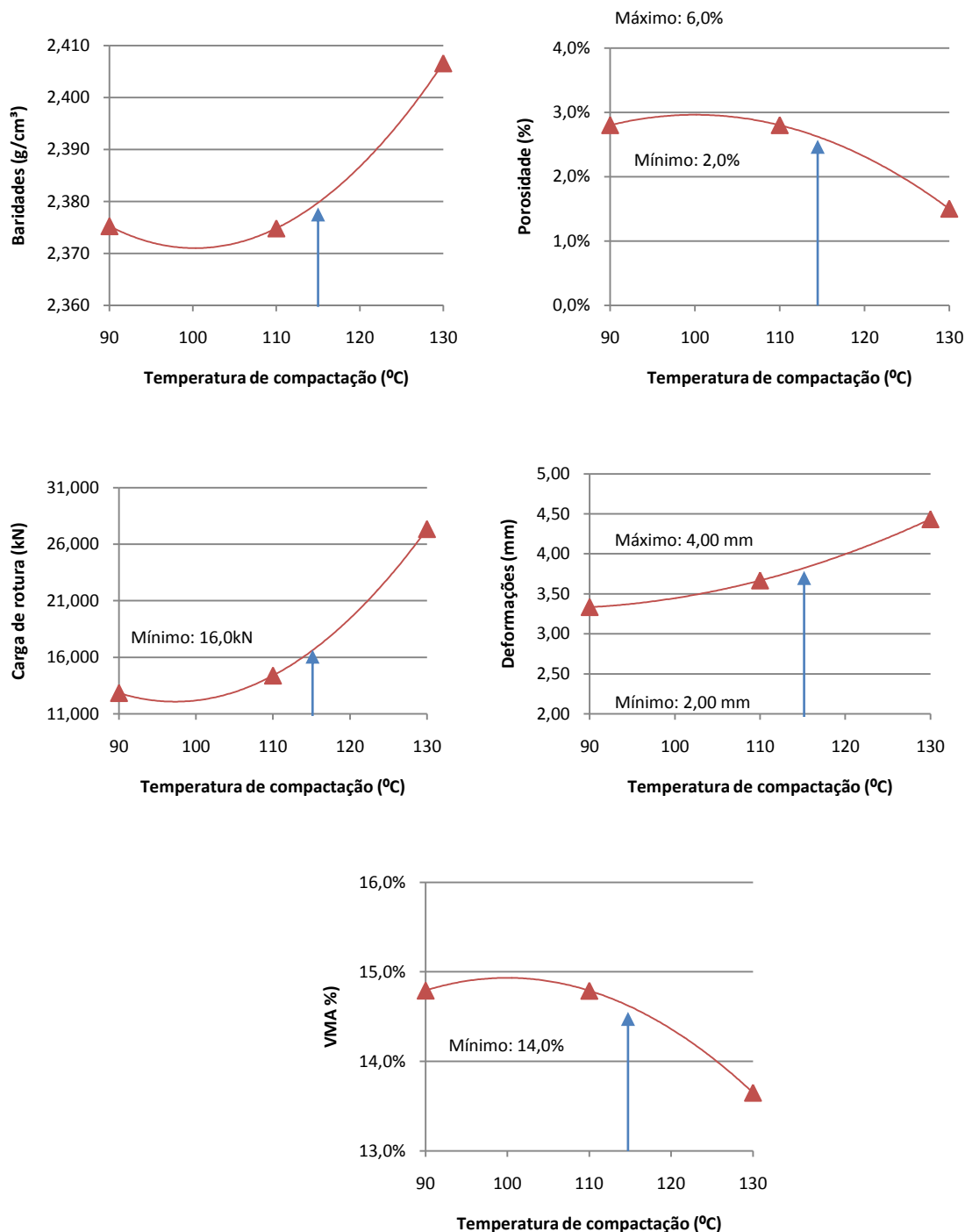


Figura 5.20 – Influência na variação da temperatura para uma MBAM com 1,0% Rediset™

Pelos resultados finais, verifica-se que a percentagem de 1,0 é a que apresenta melhores resultados, com uma redução de 50°C na temperatura de mistura e compactação. Excessiva quantidade do aditivo no ligante vai funcionar como um lubrificante, facilitando o movimento dos agregados que constituem a mistura e penalizando na sua porosidade e estabilidade.

Notar ainda, que apesar de a combinação da percentagem de aditivo/temperatura ideal ser 1% e 110°, verifica-se que, para a temperatura de 110° podem admitir-se variações na % de aditivo entre 1 e 1,5% desde que se admitam cargas de rotura ligeiramente inferiores às consideradas no CEEP para as MBQ (redução de 16 KN para 14 KN, figura 5.14).

Mantendo os intervalos de temperatura aplicados neste trabalho, obtêm-se as temperaturas mínimas de compactação e mistura representadas na tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Resumo das temperaturas finais

MBAM com Rediset™ WMX 8017	Temperatura do ligante (°C)	Temperatura dos agregados (°C)	Temperatura de mistura (°C)	Temperatura de compactação (°C)
1,0%	171	114	124	114
1,5%	171	128	128	118
2,0%	171	139	139	129
MBAM convencional	171	160	171	161

Capítulo 6

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusão

O primeiro objectivo deste trabalho foi o de estudar a interacção de dois aditivos químicos utilizados na produção de misturas betuminosas temperadas com três ligantes.

Foram utilizados dois aditivos, o Cecabase® produzido pela Ceca e o Rediset™ produzido pela Akzo Nobel. Ambos apresentam nas suas propriedades, de acordo com os produtores, o aumento da trabalhabilidade das misturas betuminosas para temperaturas inferiores às utilizadas nas misturas convencionais.

Neste estudo verificou-se que os aditivos promovem uma diminuição dos valores de penetração a 25°C e, por consequência, um aumento da temperatura de amolecimento, apesar de as diferenças, neste último ensaio não serem tão evidentes quanto no ensaio de penetração. Esta diminuição de penetração pode dever-se ao tempo que o betume esteve em contacto com o ar, durante o procedimento experimental, permitindo uma maior oxidação dos asfaltenos e das resinas, a volatilização dos componentes mais leves, e ao facto dos aditivos poderem possuir propriedades que permitam endurecer o betume.

Um dos receios iniciais era a não existência de uma boa compatibilidade entre os aditivos e um betume modificado. Neste trabalho utilizou-se um betume modificado com médio teor de borracha e os valores obtidos apontam para um comportamento idêntico aos dos betumes base, ou seja, não é a borracha que influencia as diferenças dos resultados apresentados.

A simples análise da interacção dos aditivos com os ligantes não permite concluir o valor da temperatura das misturas durante a fase de mistura e de compactação. Uma das elações a retirar deste trabalho é o facto de que a temperatura do ligante com aditivo deve ser mantida. Os agregados é que devem ser adicionados a uma temperatura inferior de modo a verificar-se o efeito desejado, ou seja, a produção das misturas a temperaturas inferiores às misturas convencionais.

Após concluído o primeiro objectivo traçado para este trabalho procurou-se saber se seria possível produzir-se e compactar uma mistura dura, de difícil aplicação, a uma temperatura inferior à recomendada para as MBQ, com introdução de um aditivo químico, Rediset™ WMX 8017.

Executadas as misturas e os ensaios de caracterização, cujas conclusões foram sendo apresentadas, verifica-se que os melhores desempenhos (maior redução de temperatura) são obtidos para percentagem de aditivo relativamente baixas. Com o aumento da percentagem de aditivo na mistura, as misturas apresentam uma menor estabilidade.

6.2. Trabalhos futuros

Num futuro próximo, pretende-se dar continuidade ao trabalho iniciado com esta dissertação, com os seguintes objectivos:

1. Elaboração de misturas betuminosas com os diferentes aditivos, com o objectivo da determinação da temperatura dos agregados, de mistura e de compactação, garantindo as características das misturas betuminosas a quente.
2. Analisar o comportamento e desempenho das MBT, verificando se os ensaios existentes são adequados à análise das mesmas assim como os métodos de formulação.
3. Utilização dos processos/aditivos utilizados nas MBT com misturas recicladas e com outros betumes modificados, de forma a verificar a compatibilidade.
4. Das principais vantagens das MBT destaca-se a redução da emissão de gases e o consumo energético durante a produção. Para confirmar a existência destas vantagens recorrer à produção das MBT em central durante elevados períodos de tempo.
5. A execução de um trecho experimental de modo a avaliar o comportamento das misturas betuminosas temperadas em situações reais.
6. A fraca adesão a estas misturas por parte dos produtores nacionais deve-se à falta de legislação. A criação de uma norma ou especificação permitiria uma maior abertura por parte dos produtores, aumentando a aplicação das MBT e numa resposta aos objectivos traçados no Protocolo Quioto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asphalt Institute (2009). “Emerging Warm Mix Asphalt Technologies” Lexington,
http://www.asphaltinstitute.org/singlenews.asp?item_ID=1746&comm=0&list_code_int=MAG01-INT (*última visita a 11 Junho de 2010*)
- Astecinc (2010). “Double Barrel Green Option” Tennessee,
http://www.astecinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=117&Itemid=188 (*última visita a 22 Fevereiro 2010*)
- Akzonobel (2010). “The new warm mix system – Rediset Wmx”
<http://www.surfactants.akzonobel.com/asphalt/newwarmmixsystem.cfm> (*última visita a 17 Fevereiro 2010*)
- Baumgardner, Gaylon L. (2008). Revix™ - Waterless technology for production of reduced temperature asphalt mistures. Northeastern Asphalt User/Producer Group, Annual Meeting, Atlantic City, NJ. 8-9 October 2008
- Beuving, Egbert (2008). “Status Report” – Warm asphalt mixtures. 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Copenhagen.
- Ceca (2010). “Green Road Formulation - Warm Mix Asphalt” La Garenne Colombes,
http://www.cecachemicals.com/sites/ceca/en/business/bitumen_additives/warm_coated_material/warm_coated_material.page (*última visita a 17 Fevereiro 2010*)
- Cen (2002-a), “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density”. EN 12697-5, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- Cen (2002-b), “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen”. EN 12697-29, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- Cen (2003-a), “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens”. EN 12697-6, European Committee for Standardization, Bruxelas.

-
- Cen (2003-b), “Bitumen and bituminous binders – Determination of viscosity of bitumen using a rotating spindle apparatus”. EN 13302, European Committee for Standardization, Bruxelles.
- Cen (2003-c), “Bitumen and bituminous binders. Determination of storage stability of modified bitumen”. EN 13399, European Committee for Standardization, Bruxelles.
- Cen (2004-a), “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor”. EN 12697-30, European Committee for Standardization, Bruxelles.
- Cen (2004-b), “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test”. EN 12697-34, European Committee for Standardization, Bruxelles.
- Cen (2004-c), “Bitumen and bituminous binders - Determination of the elastic recovery of modified bitumen”. EN 13398, European Committee for Standardization, Bruxelles.
- Cen (2004-d), “Bitumen and bituminous binders – Sampling bituminous binders”. EN 58, European Committee for Standardization, Bruxelles.
- Cen (2006), “Bituminous mixtures - Material specifications - Part 1: Asphalt Concrete”. EN 13108-1, European Committee for Standardization, Bruxelles.
- Cen (2007-a), “Bitumen and bituminous binders – Determination of needle penetration”. EN 1426, European Committee for Standardization, Bruxelles.
- Cen (2007-b), “Bitumen and bituminous binders – Determination of the softening point – Ring and ball method”. EN 1427, European Committee for Standardization, Bruxelles.
- Cen (2007-c), “Bitumen and bituminous binders – Preparation of test samples”. EN 12594, European Committee for Standardization, Bruxelles.
- Cen (2007-d), “Bitumen and bituminous binders – Determination of the resistance to hardening under the influence of heat and air - Part 1: RTFOT method”. EN 12607-1, European Committee for Standardization, Bruxelles.
- Clariant (2007). “Licomont® BS 100 for bitumen modification in road construction.”
Position Paper,
http://www.clariant.com/C1256C70004EEA54/vwLookupDownloads/DA8228E_0

- 103_BR_RoadConstruction.pdf/\$File/DA8228E_0103_BR_RoadConstruction.pdf
(última visita a 12 Abril 2010)
- Costa, R. M. (2001). "Os betumes, como materiais de construção, podem ser considerados dos mais versáteis e trabalháveis.", <http://www.galpenenergia.com/Galp+Energia/Portugues/academia+energia/artigos+tecnicos/arquivo/Conhecer+os+Betumes+Modificados.htm?mode=printer> (última visita a 4 Dezembro 2009)
- Çubuk, M., M. Gürü and M. K. Çubuk (2009). Improvement of bitumen performance with epoxy resin.
- D'Angelo, J., E. Harm, J. Bartoszek, G. Baumgardner, M. Corrigan, J. Cowser, T. Harman, M. Jamshidi, W. Jones, D. Newcomb, B. Prowell, R. Sines and B. Yeaton (2008). Warm-Mix Asphalt: European Practice.
- Dias, J. L. F. and L. Picado Santos (2009). "Avaliação do desempenho de misturas betuminosas rugosas com incorporação de alta percentagem de granulado borracha de pneus usados".
- EAPA (2010), "The use of Warm Mix Asphalt". European Asphalt Pavement Association, Brussels. Position Paper
- EP (2008), "Pavimentação – Métodos Construtivos. Caderno de encargos tipo obra". Estradas de Portugal.
- Ferreira, C., J. R. M. Oliveira and H. M. R. D. Silva (2009). "Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperadas". XV CILA - Congresso Latino-Americano do Asfalto. Lisboa.
- FHWA (2010). "Warm Mix Asphalt Technologies and Research" Federal Highway Administration, Washington, <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm> (última visita a 17 Fevereiro 2010)
- Freire, A. C. (2004). "Agregados para Misturas Betuminosas". Lisboa.
- Gandara (2010). "Iterlow - Mezcla Semi Caliente", México, www.gandara.com.mx/iterchimica/ITERLOWMezclaSemiCaliente.pps (última visita a 28 Maio 2010)

-
- Gandhi, T. (2008). "Effects of warm asphalt additives on asphalt binder and mixture properties". Civil Engineering. South Carolina, Graduate School of Clemson University. Doctor of Philosophy Civil Engineering.
- Gonzalez, O., M. E. Munoz, A. Santamaria, M. Garcia-Morales, F. J. Navarro and P. Partal (2004). "Rheology and stability of bitumen/EVA blends." European Polymer Journal : 2365-2372.
- Government Engineering (2007) " Warm Mix Asphalt Technologies and Research - Potencial to reduce fuel consumption and emissions" The Journal for Public Infrastructure , <http://www.govengr.com/ArticlesJul07/warm.pdf> (*última visita a 11 Junho 2010*)
- Homem, T.R. (2002). "Comportamento de misturas Asfálticas Porosas com Ligantes Modificados por Polímeros e Adição de Fibras". Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 129p.
- Hurley, G. C. and B. D. Prowell (2006). "Evaluation of Potential Processes for Use in Warm Mix Asphalt". Journal of the association of asphalt paving technologists. Proceedings of the Technical Sessions, 2006 Annual Meeting. 75, 41-90.
- IN.gov (2009), http://www.in.gov/indot/images/6272_heating_rock_asphalt.jpg (*última visita a 21 Novembro 2009*)
- INIR (2010). "Construção e Reabilitação de Pavimentos - Reciclagem de Pavimentos", Instituto de infra-estruturas rodoviárias, <http://www.inir.pt/portal/LinkClick.aspx?fileticket=LVK4Id9p8ME%3D&tabid=116&mid=487&language=pt-PT> (*última visita a 11 Janeiro 2010*)
- ITERCHIMICA, <http://www.iterchimica.it/> (*última visita a 3 Março 2010*)
- IPQ (1999), "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 2: Determinação granulométrica – Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas". NP EN 933-2, Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- IPQ (2000), "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Análise granulométrica – Método de peneiração". NP EN 933-1, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

- IPQ (2002-a), “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 3: Determinação da forma das partículas – Índice de achatamento”. NP EN 933-3, Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- IPQ (2002-b), “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 4: Determinação da forma das partículas – Índice de forma”. NP EN 933-4, Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- IPQ (2002-c), “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 8: Determinação do teor de finos – Ensaio do equivalente de areia”. NP EN 933-8, Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- IPQ (2002-d), “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 8: Determinação do teor de finos – Ensaio do azul de metileno”. NP EN 933-9, Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- IPQ (2002-e), “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação”. NP EN 1097-2, Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- IPQ (2003), “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água”. NP EN 1097-6, Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- Jenkins, K., (2000) “Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen.” Stellenbosch University, 2000.
- Kett, Irving (1998). “Asphalt Materials and Mix Design Manual”. New Jersey, Noyes Publications
- Kristjansdottir, O. (2006). “Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving”. Washington, University of Washington. Master of Science in Civil Engineering.
- Léon, J., Grampré, L., Barreto, G. (2009) “Mezclas Asfálticas Templadas con Aditivos Químicos”. IV Jornada Nacional – ASEFMA.
- LVBA (2010). “warm mix asphalt (WAM)”, São Paulo, <http://www.lvba.com.br/novo/imprensa/imprensa.php?p=1305> (*última visita a 16 Fevereiro 2010*)

-
- Nunes, H., F. Lucas and A. Bardesi (2009). Betumes de baixo e médio teor de pó de borracha de pneu.
- Picado-Santos, L., Pereira, P., and Branco, F. (2006). “Pavimentos Rodoviários.” Edições Almedina, Coimbra.
- Prowell, Brian D. (2007). “Warm mix asphalt – The international technology scanning program – Summary report”. Washington.
- Read, J., D. Whiteoak, R. N. Hunter and Shell Bitumen. (2003). “The Shell Bitumen handbook”. London, Thomas Telford.
- Redondo, S. G., J. I. Amor, J. Felipo, A. Costa, C. Cortés, A. Páez, F. Valor and J. J. Potti (2009). “Estudio de los aditivos que permiten reducir la viscosidad del ligante a elevadas temperaturas”. XV CILA - Congresso Latino-Americano do Asfalto. Lisboa.
- Rodrigues, F. O., F. d. M. L. L. Costa, J. B. Soares and S. d. A. Soares (2009). “Efeito Reológico do SBS E LCC em Ligantes Asfálticos”. XV CILA - Congresso Latino-Americano do Asfalto. Lisboa.
- Sasolwax (2010). “Sasobit – Asphalt technology ”, <http://www.sasolwax.us.com/sasobit.html> (última visita a 21 Abril 2010)
- Sciencera (2010). “The most unique and bizarre lakes from around the world”, <http://sciencera.com/earth-sciences/physical-geography/the-most-unique-and-bizarre-lakes-from-around-the-world/> (última visita a 19 Janeiro 2010).
- SEIXAS, P. (2008). “Reciclagem de Pavimentos com Espuma de Betume - Uma Experiência a Grande Altitude” – Cordilheira dos Andes, Peru. V Congresso Rodoviário Português. Estrada 2008. Centro de Congressos do Estoril, Portugal, 12 a 14 de Março de 2008.
- Shaw, J. (2008). “SASOL reaching new frontiers”. MorroBay, CA - Warm Mix Open House, May 7, 2008.

- Silva, H. M. R. D. d. (2005). “Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique”. Engenharia Civil - Vias de comunicação, Universidade do Minho. Obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.
- Silveira, L. E. M. d., A. C. d. S. Filho, H. B. d. Sant’Ana and J. B. Soares (2007). “Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas pela inserção de zeólitas utilizando cimento asfáltico de petróleo modificado com polímero”. 4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás. Campinas.
- Vaitkus, A., D. Čygas, A. Laurinavičius and Z. Perveneckas (2009). "Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania." The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering.
- Vaitkus, A., V. Vorobjovas and L. Žiliute (2009). "The research on the use of warm mix asphalt for asphalt pavement structures."
- Walker, Dwight. (2009). “Emerging Warm Mix Asphalt Technologies”
- Wirtgen (2001). .Foamed Bitumen . The Innovative Technology for Road Construction.. Germany.
- Wirtgen (2004). “Wirtgen Cold Recycling Manual”. (ISBN: 3-936215-05-7). Wirtgen GmbH, Windhagen, Alemanha.